

岩盤掘削中におけるディスクカッタへの作用負荷の研究 ディスクカッタと岩盤との力の相互作用

西岳 茂

正会員 三菱重工株式会社 神戸造船所 建設機械部 (〒652 神戸市兵庫区和田崎町1丁目1番1号)

岩盤は、ディスクカッタにより効率良く掘削する事が可能である。しかしながら、ディスクカッタは、取り付け半径により、寿命が大幅に異なることが知られている。特に、TBM 中心部に装備されるディスクカッタは、回転半径が若干大きな部位に取り付けられているディスクカッタとは異なった荷重が作用し、寿命低下の要因となっている。本論では、ディスクカッタの取り付け位置の変化による作用荷重の解明と、ディスクカッタの構造の最適化を目的とした。実験においては、擬似岩盤により実験条件の統一性を計り、ディスクカッタへの作用力を解明した。更に、独立回転ディスクカッタが、3枚刃一体回転構造に対して、掘削効率面での優位性があることを解明した。

Key Words: *tbm, center-disk-cutter, interaction*

1. まえがき

トンネルボーリングマシン (以降 TBM) は一般的に、山岳部で使用されるため施工深度が深くなる場合が多く、地形にはばまれるため直接的な地質調査が困難な場合も多い。近年、空中、地表面および坑内からの各種調査技術に関する研究が進み、実用化への努力が払われているが、正確に岩盤の条件を把握することは、現状の新技術を採用しても困難であると言わざるをえない。

更に、TBM は長距離掘進、転用が一般的であるため種々の条件下でも施工可能なように種々の地質条件の要素を取り入れた設計面での配慮が重要である。

TBM の設計に使用する外力は、対象とする岩盤物性を各種の試験結果より想定し、合理的に決定する必要性があるが、前述の事由により、想定条件に加え、途中で不良地盤に遭遇する場合の外力の設定も必要となる。

この様に、TBM は未確定な条件下においても合理的な掘進ができるよう十分に配慮せねばならない。ここで言う合理的な掘進とは、土木施工方法と TBM の機体設計相互の合理性に関するものである。相互の合理性の追求には、本論で課題とする TBM と岩盤との力の相互作用の解明が解決の糸口であるが、この点に関する研究は殆ど手に付いていないのが現状である。

従来、TBM は主に山岳部で発達してきたため、周辺環

境へ与える影響も少なく、前述の力の相互作用に関する研究の重要度はあまり高くなかった。

しかしながら、現在 TBM は都市部に近接して施工される場合が多く想定されており、重要な構造物に近接して施工される可能性が極めて高くなっている。これら構造物への影響を回避しながら、安全に TBM でトンネルを掘削するには、岩盤から TBM に作用する外力、言い換えれば、TBM が岩盤へ与える掘削力 (スラスト力、カッタヘッド旋回力等) の把握が必要であると考えられる。

カッタヘッドの所用旋回力は、ディスクカッタに作用する接線力が主要素であり、また、推進力は、岩盤を破碎するのに必要な力と機体と岩盤との摩擦抵抗が主要素である。そして、ディスクカッタに負荷される押付力 F と、ディスクカッタに作用する接線力 P との間には強い相関関係があることが知られている。

直線線形掘進においては、岩盤と TBM の力の相互作用問題は、ディスクカッタに作用する、押付力 F 、接線力 P 、ねじりモーメント M を把握することと、方向制御により発生する荷重の把握方法を確立する問題に帰着すると考えられる。

曲線掘削、あるいは線形制御を行う場合は、方向制御による荷重の作用の検討が必要となる。方向制御は、通常カーブ外側のスラストジャッキの推力を上げ、旋回モー

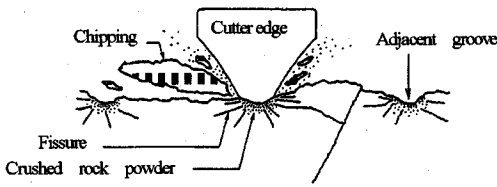


図-1 岩盤破碎状況模式図 1), 2)

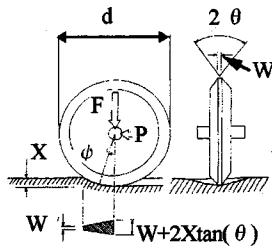


図-2 ディスクカッタによる破碎領域

メントを TBM に与えて、方向制御を実現している。このシステムの場合、総スラスト力、総トルク等は計測できるが、ディスクカッタ個々に作用する力の把握は困難であった。効率の良い掘進を実現するには、ディスクカッタの負荷能力を最大化して掘進することが望ましいが、現状では困難であり、岩盤と TBM の力の相互作用の解明に関する解決すべき課題となっている。

2. 岩盤掘削メカニズム

ディスクカッタに対する押付力 F 、接線力 P は、ディスクカッタの刃先で、クラッシング（岩盤を圧縮力で粉碎する）とチッピング（ディスクカッタ走行軌跡間の岩盤の剥離）に要する力を主として岩盤に作用し、掘進が可能となる。そして、これら TBM のスラスト推進力とカッタヘッド旋回力により作用した力 F, P は切羽、及び周辺の岩盤に伝播される。ここに、 F と P は、次式(1)、(2)で表わされる³⁾。

$$F = \sigma_{ST}(\bar{b}) \{W + X \tan(\theta)\} \sqrt{Xd} \quad (1)$$

$$\sigma_{ST}(\bar{b}) = F/A$$

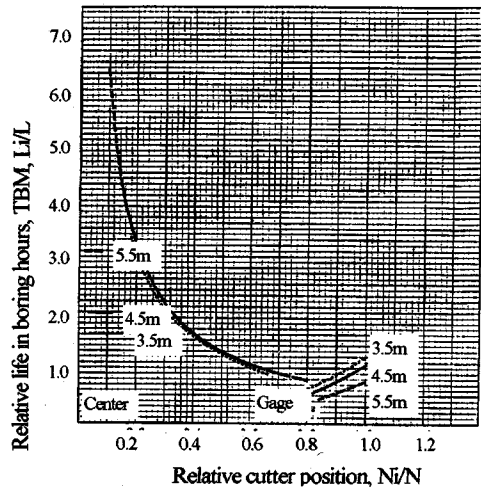
$$\bar{b}: \text{等価底部接地領域半径} = \sqrt{A/\pi}$$

$$A = \{W + X \tan(\theta)\} \sqrt{Xd}$$

$$P = 3\sigma_c X \{W + 2X \tan(\theta)/3\} \quad (2)$$

σ_c : 岩盤の一軸圧縮強度

図-1, 2 はディスクカッタによる、岩盤破碎状況と破碎領域を示している。刃先端では、岩盤はパウダ状に粉碎される。そして、周辺では亀裂が進行し、岩片が剥離する。この様にして、岩盤の掘進が可能となる。岩片の剥



Relative cutter position, Ni/N

L: 調査実績基準カッタライフ Hr

N: ディスクカッタ装備数

Ni: ディスクカッタ取付位置番号

最内周から外周へ向けて符番

Li: Ni 位置に相当するカッタライフ Hr

図中の 3.5, 4.5, 5.5m は TBM 外径を示す

図-3 取り付け位置によるディスクカッタの寿命

離には、隣接するカッタとの間隔（以下、スペーシングと呼ぶ）と岩盤の圧縮強度との関係が重要であり、通常スペーシングは 60~100mm 程度で設計されている。ところで、TBM のディスクカッタ配置設計を考えると、掘削全断面をカバーするようにディスクカッタを配置する必要性から、それぞれのカッタは、必然的に異なる半径位置に取り付けられることとなる。結果として、実施工条件においては、各カッタの位置によって掘削条件は異なることとなる。ディスクカッタは、最外周部でのゲージカッタ、中央部のセンタカッタ、それら以外のフェースカッタに、大きく取付け位置が分類される。これらの中で、特に中央に装備されるディスクカッタは、回転半径が小さいため、他のディスクカッタに比べて異なった荷重作用下に置かれ、条件的に厳しい。

最外周に位置するゲージカッタには他のディスクカッタと作用外力の方向が異なること、また、二次破碎を受ける部位であること、取付け半径が大きいため走行距離が長いこと等、他の部位のディスクカッタと条件が異なる。しかし、フェースカッタと同様、回転半径の影響は少ないと考えられる⁴⁾。以下、回転半径の影響を考慮し、押付力 F と接線力 P そしてねじりモーメント M の関係を明確にする。

(1) ディスクカッタに作用する外力

現場計測調査に基づく分析によりセンタカッタの消耗量は、他の部位に比較して顕著に多いことが、26 の実際の TBM 現場における、150km のトンネル掘進データの分析により得られている（図-3）³⁾。ゲージカッタの摩耗も

フェースカッタより当然の結果として多い。

TBM 中央部に取り付けられるセンタカッタは、他の部位のディスクカッタと異なり中心部に取り付けられており、転動距離は当然、他のディスクカッタより短い、中心付近で回転するため、ディスクカッタの刃に大きなねじりモーメントが作用することがカッタの寿命を大幅に低下する要因と考えられる。

また、TBM の最外周部に取り付けられるゲージカッタも、図-3 に示す様に、TBM カッタヘッドの一般部のディスクカッタ（センタカッタ、ゲージカッタ取付部以外の部分、以下フェースカッタ）に比較して、カッタヘッドの外周に近づくに従って、消耗量が増大することが知られている。ゲージカッタの部位は、破碎された岩片が堆積する部位を走行するため、岩片のすくい上げがスクレーパの機能のみでは一般的に不十分で、二次破碎が行われ易い場所であり、当然予測される結果である。ゲージ部はディスクカッタに作用するラジアル荷重の方向は、フェースカッタと異なるが、センタカッタのようなねじりモーメントは殆ど作用しないと考えられ、摩耗が増大する要因はそれぞれ異なると考えられる。

過去において、フェースカッタに関する研究は、直線軌道を走行する実験として行われている⁶⁾。センタカッタに関する研究は、円周軌道を走行する、単独刃での条件で、西松⁷⁾、Fangming⁸⁾等により行われている。これらは、基礎データとして有用である。更に、実際のTBMの掘削機構に近いデータを得るためには、実機におけるディスクカッタの配置を前提とした、隣接刃の影響を考慮した掘削実験が必要となると考えられる。単独刃による実験との相違は、隣接するカッタにより掘削された溝の影響、即ち、掘削溝間の連続による破碎効果の増大要素がデータの中に含まれるので、より実際に近い評価が可能となる点にある。

ディスクカッタは、現在主に、独立回転機構のディスクカッタ（1枚刃を複数並べると、複数の刃（主に2～3枚刃）が一体となって回転するディスクカッタが使用されている。（コーン形状もあるが例は少ない）

特に、岩盤対応シールドの場合、前述の、独立回転機構のディスクカッタとなったものが多用されている。複数刃一体のディスクカッタは、ねじり強度が高いことによる利点も見逃せないが、ディスクカッタの内外輪差による滑りが大きく、ディスクカッタが滑らかに転動しない為、ディスクカッタ摩耗における寿命面では不利になる可能性がある。対象としている、岩種、岩盤の圧縮強度、亀裂の状態によってはディスクカッタの滑りが少なくなることも想定されるため、岩盤の各種の条件を考慮して、単独刃、あるいは複数刃採用の方針を決定すれば良いと考えられる。しかしながら、TBM で健全な岩盤を

掘進する場合、ディスクカッタの滑りは、滑りによって発生する熱影響と滑り自身による寿命低下の問題が発生する可能性が高く、経験的に単独刃独立回転機構が良いと考えられている。

西松等⁷⁾は、ディスクカッタによる岩石掘削に関する研究で、回転半径の影響を評価している。また、Fangming等⁸⁾による、円周軌道切削における岩石の切削抵抗に関する研究では、直径150mmのディスクカッタで、回転半径100～400mmの範囲で実験を行っている。

以上の結果は、極中心に近い位置（400mm以下）と、若干離れた部位（400mm以上）とでは岩盤からディスクカッタが受ける荷重が異なっていることを示唆している。実際にスペーシングは、岩盤の圧縮強度に対して、60～100mm程度で設計される場合が多い。中央部カッタの位置で、特に摩耗形態が異なるのは、図-3より、3.5m径で $N_i/N=0.04-0.16(140-520\text{ mm})$ 、4.5m径で $N_i/N=0.03-0.12(130-520\text{ mm})$ 、6m径で $N_i/N=0.01-0.08(60-480\text{ mm})$ となっており、400～500mm以下ではディスクカッタと岩盤との力の相互作用が異なると考えた方が合理的と考えられる。TBM設計において、ディスクカッタに作用する力は、ディスクカッタ自身とそれを取り付けるサドルの強度設計に重要であるのみならず、強度的に重要なカッタヘッドの強度設計に欠かせない情報でもある。

また、岩盤に与える力は、ディスクカッタに作用する力の総和で評価できる。総和は、カッタ旋回力、スラスト力の計測で可能となる。また、スラストジャッキにパラレルリンク機構を採用すれば、各ジャッキの圧力を計測することにより、作用力の方向を知ることが出来るので、岩盤との力の相互作用が直線掘進時のみならず、曲線掘進時、線形修正時等の線形変更中も可能となる⁹⁾。

(2) ディスクカッタに作用する荷重計測試験

a) 実験方法概要

TBMにおける、ディスクカッタ配置は、前述したように、中心部では、独立回転2枚、或いは一体回転3枚が主に使用されているので、それらの特質も比較分析し、岩盤との力の相互作用を明確にすることを目的とした。今回使用した実験装置を図-4及び、実験状況を写真-1に示す。表-1は装置の仕様一覧表である。

実験は、送り速度を一定とし、回転速度10rpmで回転させ、表-2に示すセンサにより、押し付け力、ねじりモーメント、掘削トルク、接線力、貫入量、ディスクカッタのすべり状態、掘削溝の形状、掘削ズリの重量、掘削状態の経時変化を計測し、ディスクカッタ刃数、岩盤の圧縮強度等の変化による、岩盤とディスクカッタとの力の作用関係を求めることとした。

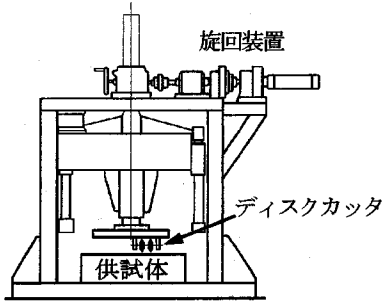


図-4 実験装置

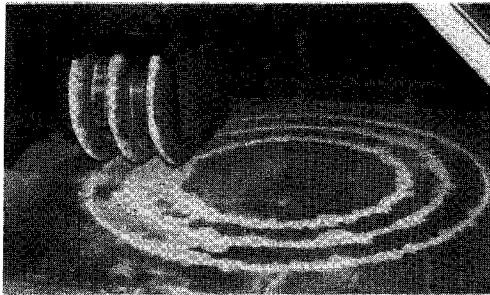
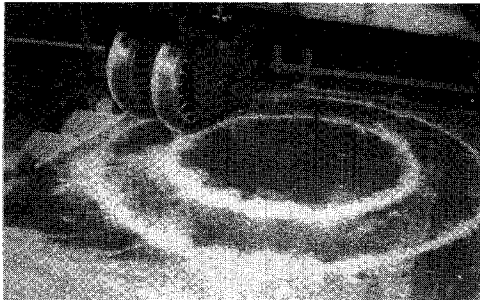


写真-1 実験状況と2,3枚刃ディスクカッタ

表-1 装置仕様

試験装置仕様			実験条件
送り	動力	5.5Kw	
	速度 v	3-150mm/min	30,70,100mm/min
	推力 F	196KN	***
回転	動力	37Kw	***
	回転数 N	0-50rpm	10rpm
	トルク	0-7840N.m	***
切り込み v/N	***	3,7,10mm/rev	

ディスクカッタは実機で使用している12インチサイズを使用した。ディスク間のスペーシングの影響検証には極力大きなディスクカッタを使用し、破碎岩片によるディスクカッタ拘束を回避することが望ましい。表-2に

計測項目を示す。

岩盤の条件を一定にするため、擬似岩盤を作製した。表-3に仕様を示す。また、擬似岩盤と実際の岩盤との比較も実施し、その相違の評価も試みた。実際の岩盤の仕様を表-4に示す。また、擬似岩盤の作製に使用した配合条件を表-5に示す。

表-2 計測項目

項目	センサ	センサ仕様	計測点数
押し付け力(Fd)	スクリージャッキ、トルク変換器	型式: TP-50KM	1
ねじりモーメント(Mt)	ロードセル(歪ゲージ)	型式: KFC-2-D16	1
掘削トルク(T)	圧力変換器	型式: PG-500KU	2
接線力(Pt)	圧力変換器	型式: PG-500KU	2
貫入量(Pe)	変位計	型式: DP-500C	1
すべり状態	ファイン式光電スイッチ	型式: FS-T20, FU35	1~2
掘削溝形状	スケール		各実験毎
掘削ズリ重量	天秤		各実験毎
掘削状態	ビデオカメラ, 35mmカメラ		各実験毎

表-3 擬似岩盤の仕様

目標強度	圧縮強度	引張強度	脆性度	形状寸法
Mpa	σ_c Mpa	σ_t Mpa	σ_c/σ_t	mm*mm*mm
30	37.2	3.10	12	1000*1000*400
70	68.6	3.95	17.4	1000*1000*400

表-4 実際の岩盤の仕様

実際の岩盤	圧縮強度	引張強度	脆性度	形状寸法
種類	σ_c Mpa	σ_t Mpa	σ_c/σ_t	mm*mm*mm
宝殿石	81.34	4.42	18.5	600*600*400

表-5 擬似岩盤の配合条件

目標強度 MPa	配合条件					
	セメント kg/m ³	水 kg/m ³	水セメント比	細骨材(海砂) kg/m ³	混和材 NL1440* gr/m ³	混和材 NP20** gr/m ³
30	450	240	53.3	1554	4500	4500
70	800	240	30	1267	8000	8000

*: 減水材, **: 流動化材

3. 実験結果

実験は、ディスクカッタの切り込みを3,7,10mm/revの3条件で実施した。パラメータは擬似岩盤の強度、ディスクカッタの回転半径とディスクカッタの種類(独立回転2枚刃及び一体回転3枚刃の二種)である。実岩盤との比較も実施して、擬似岩盤との差異も計測した。試験結果を表-6、図-5~9に示す。

表-6 擬似岩盤と実岩盤との比較

切込 (経過秒)	4mm (3s)			8mm (6s)			12mm (9s)			16mm (12s)		
	擬似	実	比	擬似	実	比	擬似	実	比	擬似	実	比
岩盤種類と比												
押付力 F KN	37.8	41.8	0.9	75.1	62.1	1.21	113.3	90.4	1.25	144.1	103.2	1.4
ねじり MNm	205.8	215.6	0.95	543.9	1156	0.47	926.1	1191	0.78	1695	3523	0.48

表-6は、切込みの増大に対する計測値である。擬似岩盤と実岩盤では、8mm以上の切り込みの場合、押付力は擬似岩盤が大きく、ねじりモーメントは実岩盤の方が大きい。実岩盤の引っ張り強度が高いことによりねじりが大きくなったと考えられる。

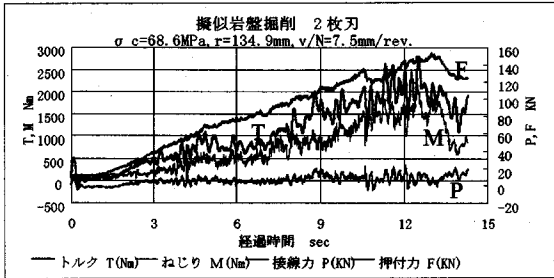


図-5 擬似岩盤における計測結果

『図-5の特徴』

- T,M,Fは経過時間とともに収束傾向にある
- 振動周期は0.2~0.25s程度である。この周期はディスクカッタ回転移動量4~5cmに相当する

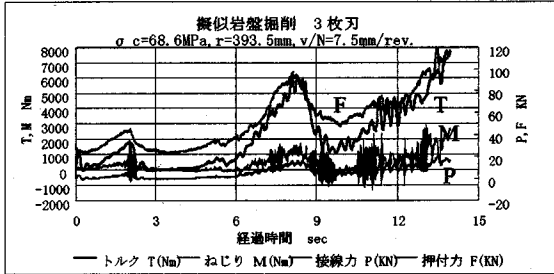


図-6 擬似岩盤における計測結果

『図-6の特徴』

- 大きな振動周期は約6s程度で、円周軌道1回転周期と一致する

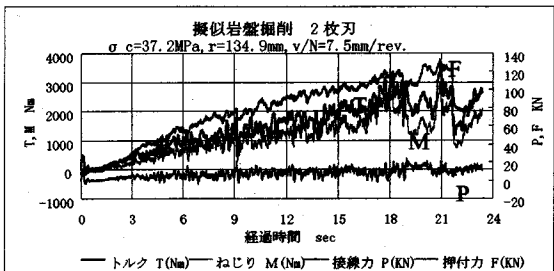


図-7 擬似岩盤における計測結果

『特徴』

- 3枚刃と同様の傾向
- T,M,P,Fいずれも負荷振動振幅が大きい
- T,M,Fは経過時間とともに収束傾向にある
- 振動周期は0.2~0.25s程度である。この周期はディスクカッタ回転移動量4~5cmに相当する。

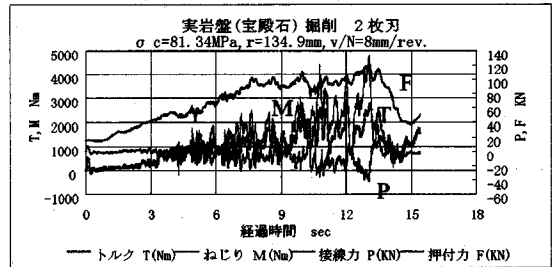


図-8 実岩盤における計測結果

『特徴』

- 所要押付力は実岩盤、擬似岩盤の差は無い (試験では実岩盤の圧縮強度が約20%大きい)
- ねじりは実岩盤の方が大きい傾向にある。

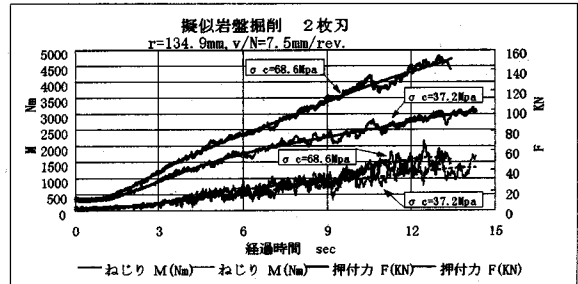


図-9 擬似岩盤による岩盤の圧縮強度と

所要ねじりモーメントと押付力の経時変化

『特徴』

- 岩盤の圧縮強度が高いほうが大きな押し付け力を必要とする。
- ねじりモーメントは岩盤圧縮強度差による差は少ない
 - 図中の曲線は6次多項式回帰分析結果を示す。

表-7は式(3)の係数表であり、分析の際、データの比較対象点の時間における、F,Mの値算出に利用する。

$$F, M = aX^6 + bX^5 + cX^4 + dX^3 + eX^2 + fX + gX^0 \quad (3)$$

表-7 多項式回帰分析係数表

係数	a(x ⁶)	b(x ⁵)	c(x ⁴)	d(x ³)	e(x ²)	f(x)	g(x ⁰)
F σc=68.6	4.72E-04	-2.14E-02	3.77E-01	-3.22E+00	1.34E+01	-1.15E+01	1.37E+01
F σc=37.2	6.15E-05	-4.29E-03	1.08E-01	-1.25E+00	6.50E+00	-4.41E+00	9.96E+00
M σc=68.6	-2.23E-03	3.11E-02	4.23E-01	-9.35E+00	5.93E+01	-6.34E+01	1.04E+02
M σc=37.2	-2.47E-03	7.93E-02	-6.37E-01	-2.87E+00	5.32E+01	-6.21E+01	5.06E+01

次に、各切り込み条件値に対応する、各種計測値の結果を示す。

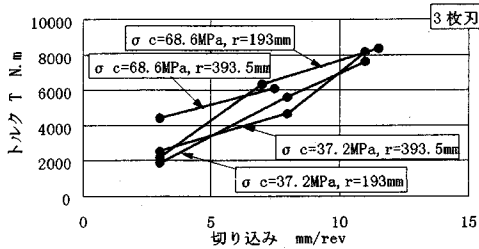


図-10 切り込みとトルクの関係 3枚刃

『図-10の特徴』

- 岩盤の圧縮強度が高い方がトルクも大きい
- 回転半径にトルクは依存しない

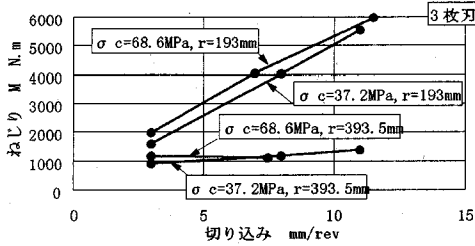


図-11 切り込みとねじりモーメントの関係 3枚刃

『図-11の特徴』

- 岩盤の圧縮強度が高い方がねじりモーメントが大きい
- 回転半径が小さい方がねじりモーメントが大きい

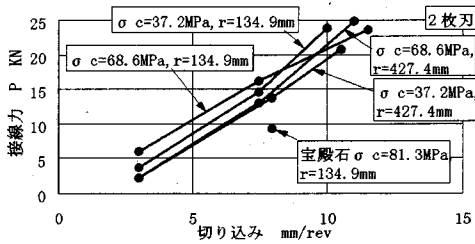


図-12 切り込みと接線力の関係 3枚刃

『図-12の特徴』

- 岩盤の圧縮強度が高い方が接線力が大きい
- 回転半径に接線力は依存しない

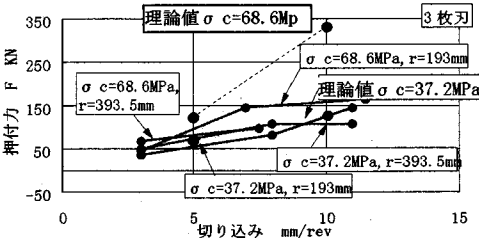


図-13 切り込みと押付力の関係 3枚刃

『図-13の特徴』

- 岩盤の圧縮強度が高い方が押付力が大きい
- 切り込みが大きくなっても押付力は一定以上増大しない。式(1)による理論値のように増大しない
- 回転半径に押付力は依存しない

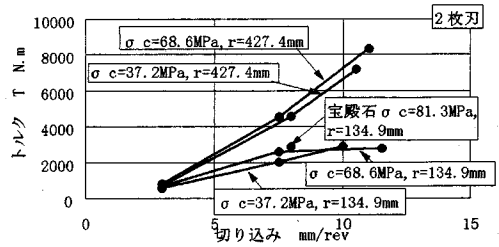


図-14 切り込みとトルクの関係 2枚刃

『図-14の特徴』

- 岩盤の圧縮強度が高い方がトルクも大きい
- 回転半径が大きい方がトルクは大きいこれは3枚刃に対して顕著な特徴である
- 実岩盤と擬似岩盤の値は類似している

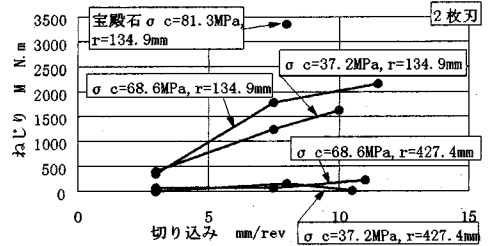


図-15 切り込みとねじりモーメントの関係 2枚刃

- 岩盤の圧縮強度が高い方がねじりモーメントが大きい
- 回転半径が小さい方がねじりモーメントが大きい3枚刃に対し、半径が大きい位置ではねじりモーメントが殆ど発生しない。これはお2枚刃に対して顕著な差である
- 実岩盤の方が値が大きい

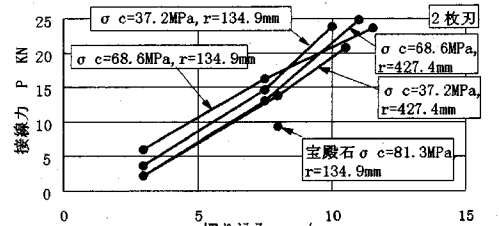


図-16 切り込みと接線力の関係 2枚刃

- 岩盤の圧縮強度が高い方が接線力が大きい
- 回転半径が小さい方が接線力は大きい
- 実岩盤の方が値が小さい

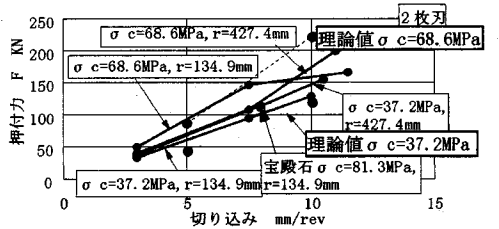


図-17 切り込みと押付力の関係 2枚刃

『図-17の特徴』

- 岩盤の圧縮強度が高い方が押付力が大きい
- 岩盤の圧縮強度が高い場合、切り込みが大きくなって

も押付力は一定以上増大しない。式(1)による理論値のように増大しない

- ・回転半径に押付力は依存しない
- ・実岩盤の方が値は小さい

表-8(a)～(d)にトルク、ねじりモーメント、接線力、押付力に着目した各種パラメータの比較をそれぞれ示す。

表-8(a) トルク N.m (回帰直線より求めた値を示す)

		2枚刃独立回転デ イスクッタ		3枚刃一体回転デ イスクッタ	
切り込み mm/rev	岩盤 圧縮 強度 Mpa	回転半径	回転半径	回転半径	回転半径
		r=134.9 mm	r=427.4 mm	r=193 mm	r=393.5 mm
5	$\sigma_c=37.2$	1228.72	2338.99	3361.4	3571.33
	$\sigma_c=68.6$	1441.97	2549.43	4101.93	5176.14
10	$\sigma_c=37.2$	2865.92	6600.29	6973.40	6948.38
	$\sigma_c=68.6$	2713.77	7240.18	7668.43	7062.09
回転半径 差による 比較結果		回転半径が大きい方が、1.8～2.3倍負荷トルクが大きい。		回転半径が大きい方が、0.9～1.3倍負荷トルクが大きい。	
岩盤圧縮 強度差に よる比較 結果		岩盤の圧縮強度が高い方が、0.9～1.2倍トルクが大きい。		岩盤の圧縮強度が高い方が、1.0～1.4倍トルクが大きい。	
2.3枚刃 の比較		回転半径が小さい場合：3枚刃は2枚刃の2.4～2.8倍のトルクを必要とする。 回転半径が大きい場合：3枚刃は2枚刃の1.0～2.0倍のトルクを必要とする			
傾向比較		回転半径が大きくなれば、トルクは急激に増加する。 岩盤の圧縮強度が高くなれば、トルクは増加する傾向にあるが、その割合は小さい。 2枚刃に比例してトルクは増大する。 即ち、トルクは、回転半径、岩盤の圧縮強度と切り込みに支配されている。		回転半径が大きくなれば、トルクは増加する傾向にあるが、2枚刃とは大きく異なる。 岩盤の圧縮強度が高くなれば、トルクは増加する傾向にあるが、2枚刃よりは小さい。 切り込みに比例して増大する。 即ち、トルクは、回転半径、岩盤の圧縮強度と切り込みに支配されている。	

表-8(b) ねじりモーメント M.N.m

(回帰直線より求めた値を示す)

		2枚刃独立回転デ イスクッタ		3枚刃一体回転デ イスクッタ	
切り込み mm/rev	岩盤 圧縮 強度 Mpa	回転半径	回転半径	回転半径	回転半径
		r=134.9 mm	r=427.4 mm	r=193 mm	r=393.5 mm
5	$\sigma_c=37.2$	762.03	44.93	2564.45	1003.45
5	$\sigma_c=68.6$	929.43	83.7	2986.52	1140.05
10	$\sigma_c=37.2$	1654.88	73.23	5024.7	1310.20
	$\sigma_c=68.6$	2003.83	182.25	5336.72	1074.7
回転半径差による 比較結果		回転半径が大きい方が、回転半径の小さい場合の0.04～0.09倍のねじりモーメントとなっている。		回転半径が大きい方が、回転半径の小さい場合の0.2～0.4倍のねじりモーメントとなっている。	
岩盤圧縮強度差に よる比較結果		岩盤の圧縮強度が高い方が、1.2～2.5倍ねじりモーメントが大きい。		岩盤の圧縮強度が高い方が、0.8～1.2倍ねじりモーメントが大きい。	
2.3枚刃の比較		回転半径が小さい場合：3枚刃は2枚刃の2.7～3.4倍のねじりモーメントが発生する。 回転半径が大きい場合：3枚刃は2枚刃の6～22倍のねじりモーメントが発生する。			
傾向比較		岩盤の圧縮強度が高くなれば、ねじりモーメントは増加する傾向にあるが、その割合は小さい。 切り込みに比例してねじりモーメントは増大する。 回転半径が大きい場合、実験の範囲で、一定の値をとる。 即ち、ねじりモーメントは、回転半径、岩盤の圧縮強度と切り込みに支配されている。			

表-8(c) 接線力 KN (回帰直線より求めた値を示す)

		2枚刃独立回転ディスクカッタ		3枚刃一体回転ディスクカッタ	
切り込み mm/rev	岩盤 圧縮 強度 MPa	回転半径 r=134.9 mm	回転半径 r=427.4 mm	回転半径 r=193 mm	回転半径 r=393.5 mm
5	$\sigma_c=37.2$	8.92	6.91	7.14	8.26
	$\sigma_c=68.6$	9.77	7.23	9.96	9.82
10	$\sigma_c=37.2$	23.07	19.26	17.44	18.11
	$\sigma_c=68.6$	13.57	21.33	20.86	15.62
回転半径差による比較結果		回転半径が小さい方が、回転半径の大きい場合の0.7~0.8倍の接線力。		回転半径が小さい方が、回転半径の大きい場合の0.7~1.2倍の接線力。	
岩盤圧縮強度差による比較結果		岩盤の圧縮強度が高い方が、0.6~1.1倍接線力が大きい。		岩盤の圧縮強度が高い方が、0.9~1.4倍接線力が大きい。	
2,3枚刃の比較		回転半径が小さい場合:3枚刃は2枚刃の0.8~1.5倍の接線力が発生する。回転半径が大きい場合:3枚刃は2枚刃の倍0.7~1.4倍の接線力が発生する。			
傾向比較		回転半径が増加しても、必ずしも接線力は増加しない。岩盤の圧縮強度が増加しても、必ずしも接線力は増加しない。切り込みに比例して接線力は増大する。即ち、接線力は、切り込みに支配されている。		回転半径が増加しても、必ずしも接線力は増加しない。岩盤の圧縮強度が増加すれば、接線力も増加する傾向にある。切り込みに比例して接線力は増大する。即ち、接線力は、岩盤の圧縮強度と切り込みに支配されている。	

表-8(d) 押付力 KN (回帰直線より求めた値を示す)

		2枚刃独立回転ディスクカッタ		3枚刃一体回転ディスクカッタ	
切り込み mm/rev	岩盤 圧縮 強度 MPa	回転半径 r =134.9m m	回転半径 r=427.4m m	回転半径 r =193mm m	回転半径 r=393.5m m
5	$\sigma_c=37.2$	61.01	68.27	57.54	71.00
	$\sigma_c=68.6$	88.78	73.34	89.45	81.18

10	$\sigma_c=37.2$	129.21	146.97	122.54	108.95
	$\sigma_c=68.6$	158.08	172.49	158.25	114.08
回転半径差による比較結果		回転半径が小さい方が、回転半径の大きい場合の0.8~1.1倍の押付力。		回転半径が小さい方が、回転半径の大きい場合の0.7~1.2倍の押付力。	
岩盤圧縮強度差による比較結果		岩盤の圧縮強度が高い方が、1.0~1.5倍押付力が大きい。		岩盤の圧縮強度が高い方が、1.0~1.60倍押付力が大きい。	
2,3枚刃の比較		回転半径が小さい場合:3枚刃は2枚刃の0.9~1.1倍の押付力が発生する。回転半径が大きい場合:3枚刃は2枚刃の倍0.7~1.1倍の押付力が発生する。			
傾向比較		回転半径が増加しても、必ずしも押付力は増加しない。岩盤の圧縮強度が増加すると押付力は増加する傾向にある。切り込みに比例しては押付力は増大する。即ち、押付力は、岩盤の圧縮強度と切り込みに支配されている。		傾向は2枚刃と同様で、絶対値もほぼ同一の値である。	

4. 結果のまとめ

表-8(a)~(d)より得られた結果をまとめる。結果は、それぞれ、荷重の種類別の表とし、回転半径、岩盤圧縮強度、2と3枚刃、について、回帰分析を実施し、数値を比較するとともに、傾向比較も行った。その結果、

表-8(a)より下記知見が得られた。

- (1) 回転半径が大きい方がトルク負荷が大きいことより、ディスクカッタが有効に岩盤に食い込んでいるといえる。これは、岩盤への食い込みにより、ディスクカッタ側面の抵抗が上昇した結果であり、トルク負荷の差により判断できる。
- (2) 2枚刃の方が、3枚刃よりトルク負荷が大きい。2枚刃のディスクカッタの方が3枚刃に比べ、有効に岩盤に食い込んでいることを示しており、2枚刃の方が掘削効率が良い。

表-8(b)より下記知見が得られた。

- (1) 3枚刃は、2枚刃に比べて大きなねじりモーメントが発生しており、岩盤へ与える影響が2枚刃より大きいと言え、不良地盤帯においては切羽岩盤をねじり力により剥離させ易く、切羽安定面では不利な材料の一つである。
- (2) ディスクカッタ自身に作用するねじりモーメントが、3枚刃は2枚刃より大きく、3枚刃の場合、ディスクカッタを取り付ける強度を高く設計する必要がある。
- (3) 2枚刃は単独回転機構のため、ねじりの絶対値が小さく、滑らかな回転が可能である。

表-8(c)により下記知見が得られた。

- (1) 接線力は、2,3枚刃では差異が少なく、TBM 所要トルク設計には関与しない。所要トルクは、岩盤の圧縮強度、切り込み量に支配されるため、設計に当たってはこれらの値を重視する必要がある。
- (2) TBM スラスト装備能力を、岩盤の圧縮強度及び切り込み速度から決定し、その値を利用してTBM 装備トルクを設定しても問題はない。
- (3) 岩盤とTBMの力の相互作用評価には、スラストジャッキの変化を捉える方法が簡便で、有効である。
- (4) スラストジャッキ力の総合計値、力の方向を計測することにより、切羽岩盤への過剰力を与えないように掘進することができるので、実機での計測方法の確立が重要である。

表-8(d)より、下記知見が得られた。

- (1) 押し付け力は、2,3枚刃では差異が少なく、TBM 押し付け力設計には関与しない。押し付け力は、岩盤の圧縮強度、切り込み量に支配されるため、設計に当たってはこれらの値を重視する必要がある。
- (2) 接線力と同様、TBM スラスト装備能力を、岩盤の圧縮強度及び切り込み速度から決定すればよい。但し、不良地盤帯で完全に土砂地山化している場合は、シールド推進負荷の算定の考え方に従う必要がある。

以上をまとめると、下記総合知見がえられる。

- (1) TBM と岩盤との力の相互作用を評価するには、スラストジャッキに作用する荷重変化をリアルタイムに正確に計測し、荷重の絶対値、作用方向、変動を把握すれば有効である。
- (2) ディスクカッタは独立回転機構の構造が、切羽への影響を少なくし、掘削効率を上げ、機械構造強度を合理的に設計できる観点から、3枚刃一体構造より有利である。

5. あとがき

高強度岩盤を機械的に掘削する目的においては、現在、ディスクカッタによるものが最も効率の良い掘削方法と考えられる。発破による掘削に比べ、周辺へ与える振動も少なく、環境保全面においても有用な掘削環境をディスクカッタは与えることができる。しかしながら、ディスクカッタは岩盤を破碎し掘削するメカニズムのため、強度面、寿命面では厳しい環境で使用されている。ディスクカッタに作用する外力を把握することは、機械設計面で十分な強度を持たせ安全、確実な機械を提供できる利点があるのみならず、岩盤へ与える力を知ることにより、切羽の安定性確保のための最適荷重を管理し、効率の良い掘進が可能となる。TBMの推進システムは著者らが開発した、冗長軸を含む推進システム⁸⁾により、切羽よりの作用外力がベクトルとしてリアルタイムに検知できるので、当該研究結果と合わせ情報化施工の一助とすることができる。

参考文献

- 1) The university of Trondheim the Norwegian institute of technology the division of construction engineering: *Project report 1-88 HRAD ROCK TUNNEL BORING*, P.143.
- 2) 江口 工, 岡村 宏, 町田 和美: 大口径ローラカッタビットに関する研究: 熊本大学工学部研究報告, 第32巻第2号, pp.14, 1983.9.
- 3) G. WIJK: A model of tunnel boring machine performance, *Geotechnical and Geological Engineering*, p.24, 1992.10.
- 4) G.Fangming, 佐藤 一彦, 浅井 透明: 円周軌道切削における岩石の切削抵抗, 資源・素材学会誌, 108, No.7, pp.562, 1992.
- 5) The university of Trondheim the Norwegian institute of technology the division of construction engineering: *Project report 1-88 HRAD ROCK TUNNEL BORING*, P.170.
- 6) 高岡 三郎, 速水 博秀, 三沢 茂夫: ローラリーカッタによる岩石破碎に関する研究 (第1報), 日本鉱業会誌, Vol.84, No.960, pp.427-432, 1968.4.
- 7) 西松 裕一, 奥野 昇, 平沢 幸久: ローラカッタによる岩石掘削に関する研究, 日本鉱業会誌, Vol.91, No.1052, pp.653-658, 1975.10.
- 8) 西岳 茂, 石瀬 文彦, 本村 四郎, 田中 昭夫, 松浦 武: パラレルリンクによるTBM推進システムの開発, 土木学会論文集, No.540/VI-31, 135-143, 1996.6.

(1996. 2. 14 受付)

**STUDY ON ACTING FORCES TO THE DISK CUTTERS DURING EXCAVATION
BY USING TBM-INTERACTION FORCES BETWEEN ROCK AND DISK CUTTERS**

Shigeru NISHITAKE

Disk cutters can excavate rock efficiently. But, the life of disk cutters are affected from the mounting position to the cutter head. Especially, the disk cutters installed at the center of cutter head are loaded by irregular force which induces the short life of disk cutters. In this paper, the acting forces are cleared near by center position of TBM. The experiment were carried out using the artificial rock models in order to keep the experiment conditions. The independent rotary type cutter with two disks is more suitable than the one body cutter with three disks.