

TBM 用ローラーカッタの研究

Research and Development of Cutter for Tunnel Boring Machine

小室 一夫*
Kazuo Komuro

中島 利美**
Toshimi Nakajima

宇津木 薫***
Kaoru Utsugi

要 約

ジオフロントとか大深度地下利用など華々しい構想が発表されているが、その施工には苛酷な条件が予測される。それぞれに多様な問題点があげられ、その一つに硬岩盤層の掘削がある。この技術の開発をめざし独自の TBM を開発、心臓部である岩盤切削利用のローラービットの材質、形状、機構について研究開発し、一軸圧縮強度 $\delta=1800\text{kgf/cm}^2$ 以上もある花崗岩層の切削に挑んだ報告である。

目 次

- §1. はじめに
- §2. カッタの形状とピッチ
- §3. カッタ材質と製造法
- §4. 研究の成果と考察
- §5. まとめ

§1. はじめに

今までの硬岩層掘削は発破工法が常識とされていた。しかし最近は市街化が激しく発破振動による公害や日本特有の硬・軟地盤の互層による工法選択の難しさ、更には工期短縮、技術者不足、安全性などの点から TBM 工法が注目を集めることになった。我々もジオフロントなど時の流れに乗って岩盤掘削技術の開発の手掛かりを模索中のところ最適の対称工事を受注、即刻研究開発に着手した。九州、八幡市で計画された下水道用のトンネル工事は、掘削外径 $\phi 2200\text{mm}$ (Fig. 1) で、平尾花崗閃緑岩と呼ばれる岩盤層を約 620m に渡りトンネルをくり抜くもので、この花崗岩層の層境部分は亀裂が発達し風化

が進んでいた。しかし少し内に入ると均質で新鮮な花崗岩 (一軸圧縮強度 $\delta=1800\text{kgf/cm}^2$ 以上) で石英含有率も高く最大 39% に達するもので、当初の地質調査により設計されたカッタービットでは摩耗も破損も激しく頻繁なカッタービットの交換を余儀なくされた。急ぎ超硬岩用の強靱な切削ビットの開発が必要となった。まず靱性、耐摩耗性、硬度、加工性などの面から材質の選択が行なわれ、次に切削効率の面から刃の形や取付角度等の研究が行なわれた。さらに最終段階では焼入れ方法が研究された。これらの研究成果を報告するものである。

§2. カッタの形状とピッチ

はじめにカッタ取付位置を Fig. 2 に示す。①～②はセンターカッタ、③～⑩はインナーカッタ、⑪～⑭はゲージカッタで、Fig. 3 にその形状を示す。

設計段階で、カッタ交換回数を最小限におさえることが重視され、最も耐摩耗性の高いチップインサート型を採用した。しかしながら、先端摩耗が Fig. 4 のようになり、刃の先端が岩盤に食い込まずに掘進不能となった。その原因として考えられたことを以下に記す。

- 1) 超硬チップの周囲の硬度が低いため、軟らかい部分から摩耗が進み、均一摩耗とならず刃形が変わる。

*平塚製作所所長
**機材部副部長
***平塚製作所

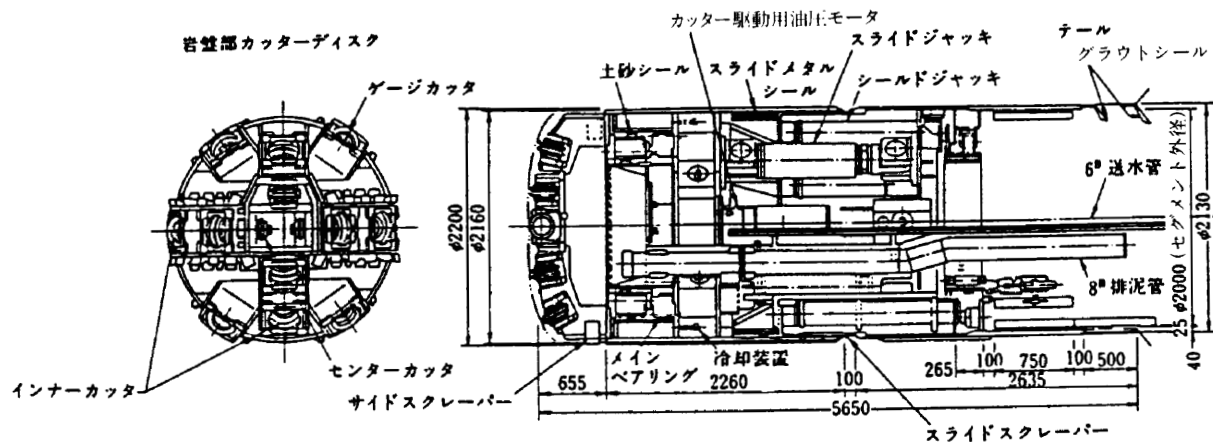


Fig.1 TBM構造図

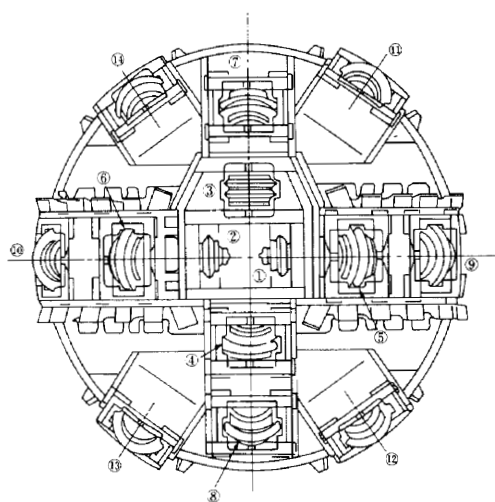


Fig.2 カッタ取付位置関係

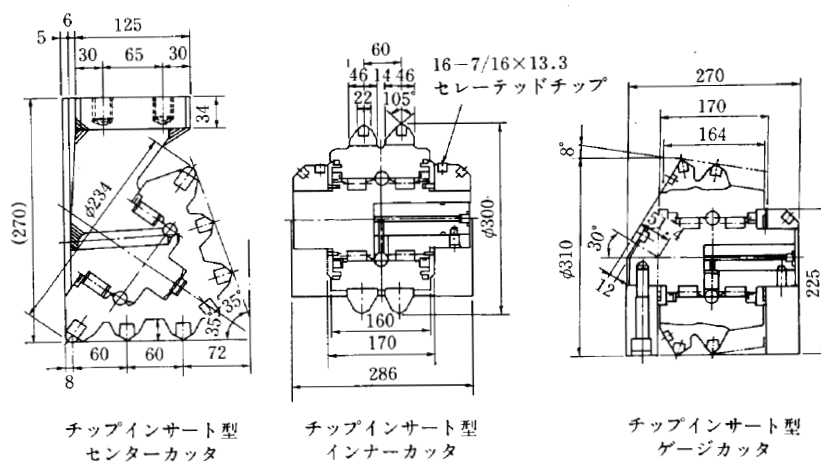


Fig.3 カッタ形状

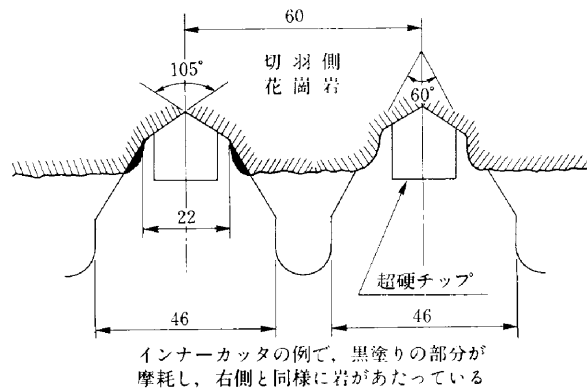


Fig.4 刃先摩耗状況

2) 刃の先端角度が鈍角なため、岩に食い込まず破碎を起こさない。

3) 刃のピッチが、60mmでは広過ぎて破碎効果が生じない。

以上の三点に対し検討した結果を以下に記す。

1') 均一摩耗に近い状態にするにはチップインサートでは不可能なため、ディスクカッタにする必要がある。

2') 刃の先端角度は、ディスクカッタにおいて同一岩を90°と70°で掘削した場合、70°の方が削孔性能が良いという実験データ (Fig. 5) がある。

3') 刃の取付ピッチは、50mmと60mmで削孔比較した場合、Fig. 5によれば50mmの方が良い。

1'~3'に対し、次の方針を採用することとなった。

1'') 均一摩耗にするため、チップインサートの無いディスクカッタを採用し、刃に摩耗等を生じた場合でも刃のみの交換ができるものとする。

2'') 刃の先端角度は、削孔性能だけからすれば70°が良いが、刃先が鋭い分だけ摩耗に対する寿命が短くなると予想されるため、90°を採用する。

3'') 刃のピッチは、隣接カッタ本体取付位置が60mmピッチとなっているため、そこまで改造する訳にはいかないので、60mmのままとする。

4'') ゲージカッタに関しては、破碎荷重を大きくするためにシングル刃とする。

以上の結果、センターカッタは Fig. 3 のまま Fig. 2 の①と②へ、インナーカッタは Fig. 6 のものを③~⑩へ、ゲージカッタは、Fig. 6 の外刃を⑪と⑬へ、中央刃を⑭へ、内刃を⑫へ取付けることにした。

§ 3. カッタ材質と製造法

現在のところ、カッターリングに適する材料は工具鋼

削孔実験の試験条件

カッター回転数 N (rpm)	N_1	N_2	N_3	N_4
	13.64	17.65	25.0	30.0
荷重 W (tf)	W_1	W_2	W_3	W_4
	26.0	39.5	50.5	70.0

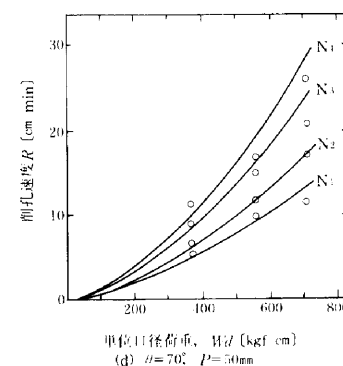
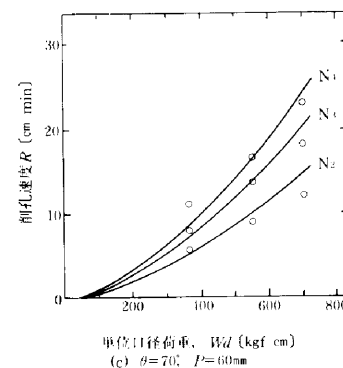
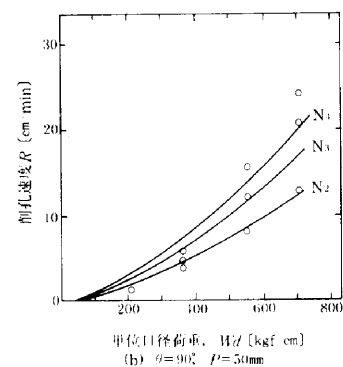
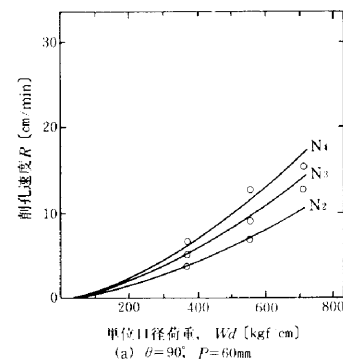


Fig.5 削孔速度(R)に及ぼす刃先角度(θ)とカッターピッチ(P)の影響：甲府安山岩

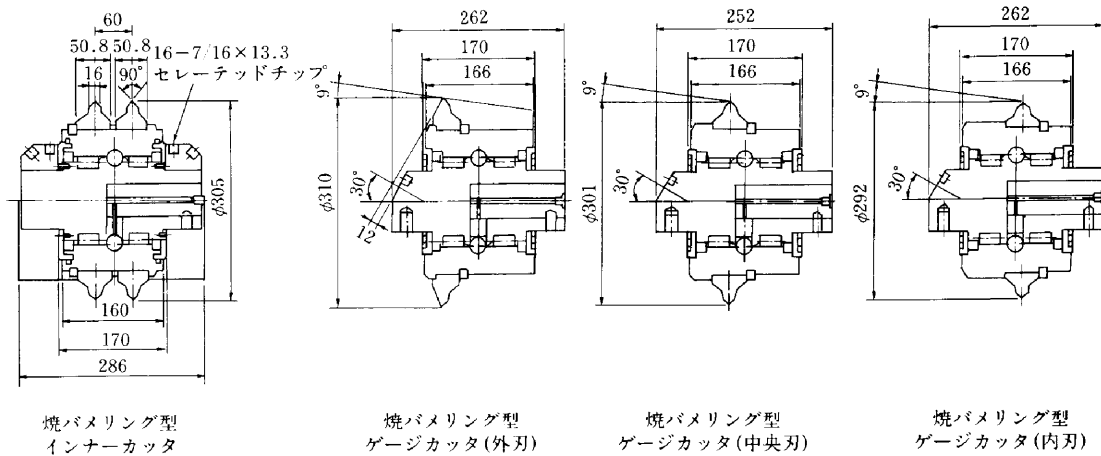


Fig.6 ディスクカッタ形状

Table 1 化学成分表(%)

材 質	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	V
SKD11	1.40~1.60	0.40以下	0.60以下	0.030以下	0.030以下	11.00~13.00	0.80~1.20	—	0.20~0.50
SNCM439	0.36~0.43	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030以下	0.030以下	0.60~1.00	0.15~0.30	1.60~2.00	—

とされており、その分類を Fig. 7 に示す。この表のなかの耐摩不変形鋼が使用され、その一種に SKD-11 がある。耐摩不変形鋼とは、焼入れ変形を生じにくい耐摩耗用の合金工具鋼という意味である。カッターリングは、鋼に焼入れ焼戻しを行ない、硬度をあげた耐摩耗性の高い材料であると同時に衝撃に対して強く靱性の高い材料でなければならない。

今回の工事では、上記の SKD-11 とこれと同種で大同特殊鋼の開発製品である DC-53 及び、この二つとは全く異種の構造用合金鋼 SNCM-439 の三種類の使用比較を行なった。

まず、SKD-11 と SNCM-439 の化学成分比較を Table 1 に示す。また、成分ごとの性質を以下に示した。

C (炭素) は、多い程焼入れ硬度は高くなるが靱性が劣化する。Si (ケイ素)、Mn (マンガン)、Mo (モリブデン) は、焼入れ性を良くするためのものである。Cr (クロム) は、耐摩耗性を向上し、焼入れ性を良くするものである。W (タングステン)、V (バナジウム) は、耐摩耗性を高めるが焼入れ性が悪い。Ni (ニッケル) は、靱性を向上させるために有利となり、焼入れ性をいく分高める。

次にカッターリングの製造工程及び熱処理工程について述べることにする。カッターリングとして生かすも殺すもこの両者によって決まるといっても過言ではないほ

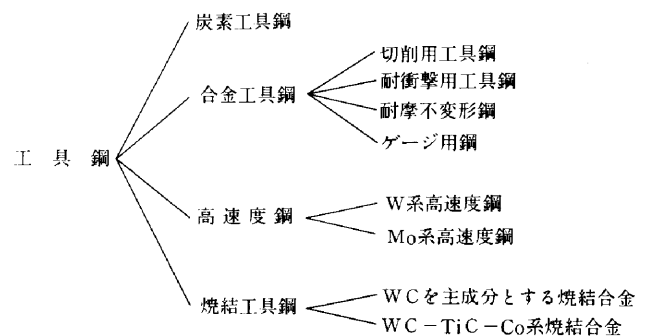


Fig.7 工具鋼の分類

ど重要な事項である。

1) SNCM-439の場合

材料切断→リング鍛造→焼ならし→機械加工→焼入れ→高周波焼戻し→内径研磨仕上げ

2) SKD-11の場合

鍛伸機→切断→リング鍛造→焼なまし→機械加工→焼入・焼戻し→高周波焼入れ→内径研磨仕上げ

3) DC-53の場合

この材料は、開発製品のためディスクカッタとして使用した実績が少なく、適正な製造工程が確立されていない。従って、本研究において確立すべく2種類の製造を試みた。

- a) 材料切断→機械加工→焼入れ・焼戻し→内径
研磨仕上げ
- b) 材料切断→リンク鍛造→機械加工→焼入れ・

焼戻し→内径研磨仕上げ

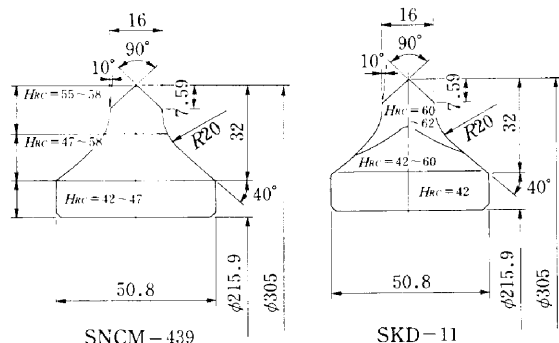


Fig.8 インナーカッタ断面硬度分布

§4. 研究の成果と考察

(1) インナーカッタ

カッタ取付位置ごとの転走距離比較を Table 2 に示す。これは、刃先部に於る摩耗限界を10mmとして得た実績である。数値的には、SKD-11の方が SNCM-439より寿命が延びており、耐摩耗性が高いことを表わしている。この点は、熱処理の段階で刃の表面硬度計測定値が、SKD-11において $H_{RC}=42\sim62$ に対し、SNCM-439では、 $H_{RC}=42\sim58$ とやや低い値となっているためである。ここで、刃の断面における硬度分布を Fig. 8 に示す。大きな衝撃を受けるデイスカッターリングは、このよう

Table 2 インナーカッタ転走距離(km)

材 質 \ 取付位置	No. 3	No. 4	No. 5	No. 6	No. 7	No. 8	No. 9	No.10	平均値
SNCM439	253.7	215.0	307.5	346.7	494.5	558.7	309.1	312.3	349.7
SKD11鍛造品	223.3	234.4	360.5	397.8	392.4	443.4	803.7	499.4	419.4

Table 3 ゲージカッタ転走距離(km)

材 質 \ 取付位置	No.11, No.13(外刃)		No.12(内刃)		No.14(中央刃)	
SNCM439	110.0	256.1	平均 176.3	343.9	平均 343.9	343.9
	135.1×2台					平均 343.9
	210.7×2台					
SKD-11	0.07×2台		平均 30.3	0.07	平均 30.3	0.07
	88.2×2台			88.2		88.2
	2.7×2台			2.7		2.7
SKD-11 鍛造品	168.2×2台	343.9×2台	平均 228.5	557.0	平均 359.1	133.1
	184.8	195.3×2台		43.2		557.0
	198.0	161.7		345.8		315.1
	315.1	52.3		432.7		345.8
	250.1			416.8		432.7
	432.7×2台					416.8
DC-53	2.7×2台	71.0×2台	平均 89.8	2.7	平均 280.3	2.7
	162.0×2台	69.0		439.5		350.0
	190.0×2台	13.0		398.8		76.0
	76.0×2台	81.6				342.0
DC-53 鍛造品	100.9	61.4	平均 67.3			
	42.0	64.9				

に刃の表面から内面に渡って徐々に硬度を下げることに
より割れや欠けが入りにくくする必要がある。しかし、
こうした熱処理は非常に高度な技術が要求され、製造工
程のどのひとつにおいても細心の注意を払わなければな
らない。

以上のように、インナーカッタにおいて刃自体は満足
する結果が得られたので、製造工程の確立されていない
DC-53を使用するのを避けた。

(2) ゲージカッタ

カッタ取付位置ごとの転走距離比較を Table 3 に示
す。インナーカッタと同様刃先部における摩耗限界を10
mmとして得た実績である。最外周の外刃に比べ、内刃・
中央刃における寿命の方が大きいのは、外刃の負担が大
きいことを示したものと判断できる。また、内刃・中央
刃に関して材質ごとの考察を以下に記す。

SNCM-439は、Table 2 のインナーカッタの場合と
比較するとほぼ同様な数値となっている。

SKD-11は、ゲージカッタに限り鍛造しないものを使
用した実績があったので参考までに記したが、鍛造品と
比べ著しく寿命が短い。これは、鍛造することの重要性
を表わした結果と言える。SKD-11の素材における内部
組織中に一次炭化物が存在するが、熱処理後にも残留し
その大きさ形状が割れに大きく影響する。しかし、熱処
理後の組織でマルテンサイト中に炭化物が存在する方が
耐摩耗性が向上するため、炭化物は必要とされる。鍛造
することによりこの一次炭化物をある程度微細化し、均
一な組織にして割れの生じにくいものになっているのであ
る。鍛造後の顕微鏡写真を Photo 1 に示す。白く見える

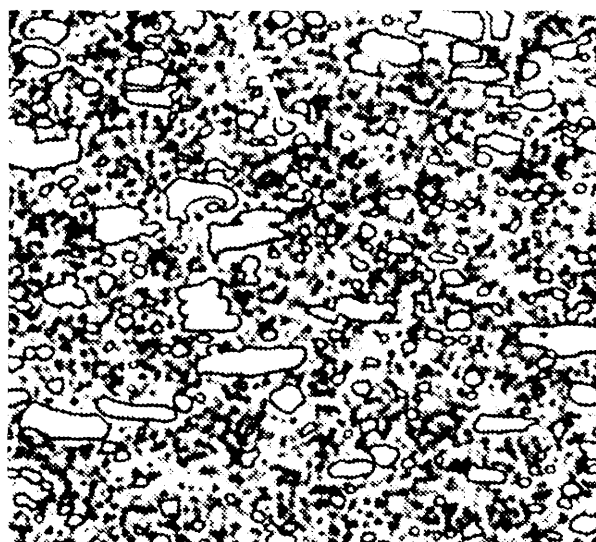


Photo 1 SKD11鍛造後のミクロ組織と炭化物
(×400)

のが炭化物である。炭化物が均一に微細化しているのが
よくわかる。以上から、SKD-11をディスクカッタに使
用するには、鍛造工程が必要不可欠と言える。

DC-53は、鍛造品でないものの実績しかないが、
SNCM-439、SKD-11 (鍛造品) と比較して寿命が安
定しておらず、これは熱処理工程における管理に問題が
あると言えるだろう。

次に外刃に関して材質ごとの考察を以下に記す。

Table 3 からわかるように、内刃・中央刃と比べ外刃
の寿命が極端に異なるのは、前述したように外刃の負担
が大きいからで、摩耗が非常に速いことによるものであ
る。また、その摩耗は刃先よりも外周からの側面摩耗が大
きく、急速に進行し刃がやせた状況になるというもので
あった。従って、外刃のみの材質別比較を以下に示す。

SNCM-439及び SKD-11 (鍛造品) 以外は、どの場
合も寿命が短かすぎて実用的な数値とならなかった。
SKD-11では、鍛造・焼なましの重用性を表わしたもの
であり、DC-53では、鍛造の有無に関係なく熱処理の難
しさを表わした結果であるといえる。SNCM-439は、
SKD-11 (鍛造品) と比べると焼入れ硬度の点からみても耐摩耗性に欠けるのは間違いない。しかしながら、同
じ材質のものを同時に取付けた場合、SNCM-439の場合
はほぼ類似した摩耗であったが、SKD-11 (鍛造品)
の場合は、片側が良くてももう片側が摩耗限度に至ると
いう不規則なケースが多かった。これは、SNCM-439
における製造工程はほぼ完成されたものであるが、
SKD-11 (鍛造品) は製品のバラツキによる寿命の差異
が考えられ、より一層の品質管理が要求されるように思
われる。SKD-11 (鍛造品) が、カッターリングとして
一様な性質をもつようになれば、経済性・市販性を考慮
しても最も有力な材質であると言えるであろう。また、
SKD-11の熱処理上特に重要なことは、硬度を一様にせ
ず、刃の表面から内部にかけて硬度を下げ、靱性を持た
せることである。硬度が一様なときの破壊例を Photo2
～4 に、その硬度分布を Fig. 9 に示す。

(3) ディスクカッタ本体

初めに採用したのは、Fig. 6 のボールベアリングと
ローラベアリングを組合わせたものであったが、ボール
ベアリング部の強度不足によりガタが発生したため、ボ
ールサイズを $\frac{7}{8}$ B から 1 B に変更した。インナーカ
ッタに関しては最後まで 1 B のまま使用したが、硬岩部
においては $\frac{7}{8}$ B の時と同様に短期間でガタが発生し、刃の
寿命より短いケースが多く、満足できるものではなかつ
た。ゲージカッタに関しては、ボールベアリングでは、
強度が満足せず、Fig. 10 に示すような全ローラベアリ

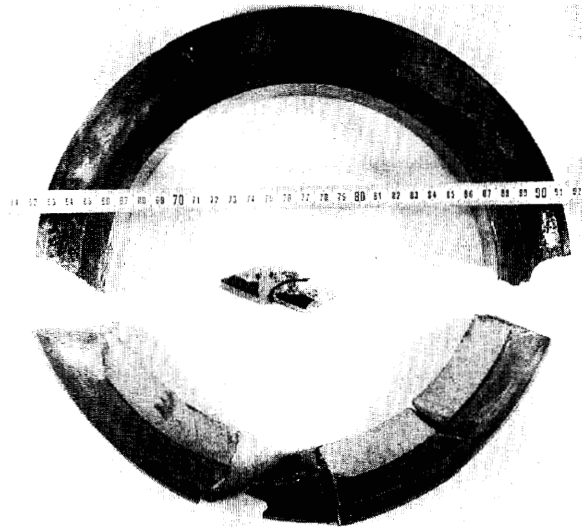


Photo 2 破壊したカッタリング

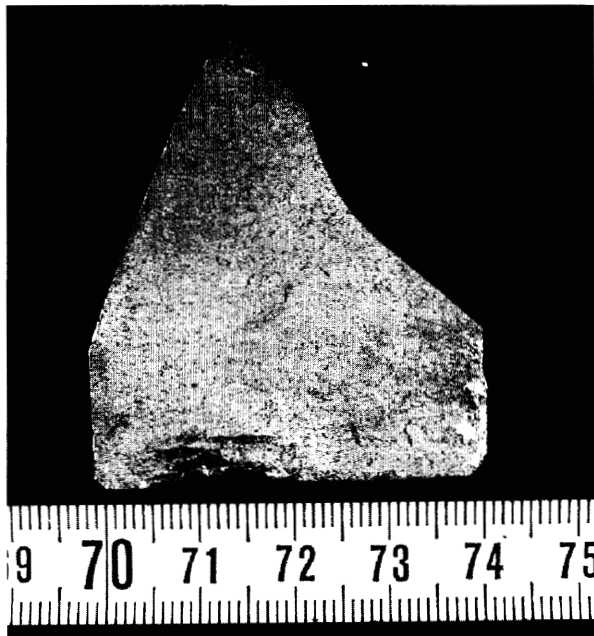


Photo 3 破断面

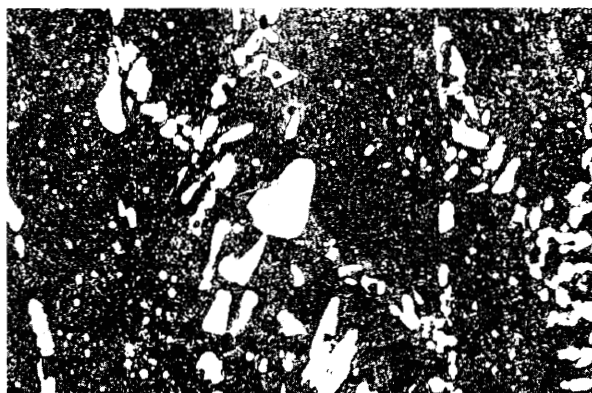


Photo 4 刃先付近のミクロ組織と炭化物(×400)

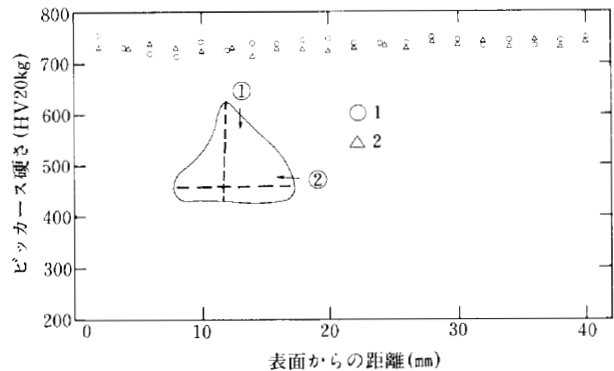


Fig.9 破断面の硬度分布

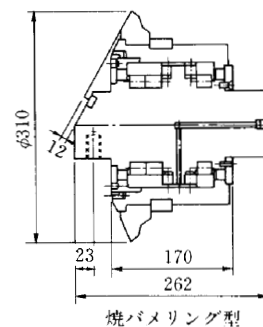


Fig.10 全ローラ型ディスクカッタ本体

ングタイプを採用した。この結果、耐荷重に関してはガタの発生も小さく、ローラの摩耗も少なくなった。しかし、今まで述べてきた全てのゲージ用ディスクカッタ本体は、硬岩部・軟岩部にかかわらず外周側面摩耗が激しく、オイルシールを削る傾向にあった。これは、外周切削面とオイルシールカバーのスキマが10mm前後しかなく、切削した岩片がカッタ側面にまわり込んでこのスキマに入り摩耗を速めたものと思われる。このスキマは、ディスクカッタ本体の取付角度により大きく影響するもので、今回は刃先がカッタ回転軸に対して30°の角度で向くように設計されたため側面摩耗を速める結果となった。従って、TBMにおける外周部のディスクカッタ本体は、Fig. 11のように立てて取付けるのが理想的と言えるだろう。

つぎにディスクカッタ本体の問題点として、耐水構造について述べる。以上のディスクカッタ本体は、水圧に対し全て TCN 型オイルシールで止水するものであり、内側には極圧性グリースを封入するものであったが、実際にはどのカッタも全て水が流入し、内側のグリースが洗い流される結果に終わった。TCN 型オイルシールは、

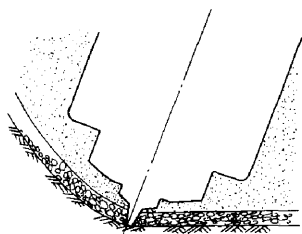
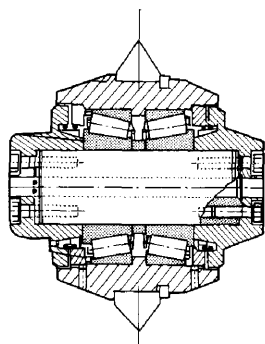


Fig.11 外周カッタの取付角度

Fig.12 テーパーローラベアリング型
ディスクカッタローラ

サージ圧で 10kgf/cm^2 、 0.5m/sec の周速時で 4kgf/cm^2 の耐圧を持つが、実際の水压は 1kgf/cm^2 以下であったにもかかわらず、全て水が流入するという状況であった。これに対し、実験的に Fig. 12 のような構造のカッタを取付け掘削後分解した結果、水の流入はなくベアリングもほとんど摩耗していない状態であった。このカッタは、荷重を二列で対抗したテーパーローラベアリングで受け、止水はフローティングシールと呼ばれるシール材を使用しており、内部に潤滑油を封入してある。取り付けしたのは2個であったが2個共油が残っていた。また、このタイプのディスクカッタ本体は、部品点数も少なく、分解及び組立てがしやすいため、メンテナンスに掛かる費用も節減できるであろう。ただし、テーパーローラベアリングは、メーカーが何社かあるが、最も品質の良いものを使用することが要求される。そして、ディスクカッタ本体サイズも取付け及びメンテナンスの許す限り、できるだけ大きいサイズを選定するのが好ましい。

(4) カッタの形状

最後に今後の研究課題のひとつであるカッタの形状について述べる。

カッタの形状を考える際に忘れてはならないのは、岩破碎のメカニズムである。その概念図を Fig. 13 に示す。図のように岩盤にカッタを押し付けてクラックを発生

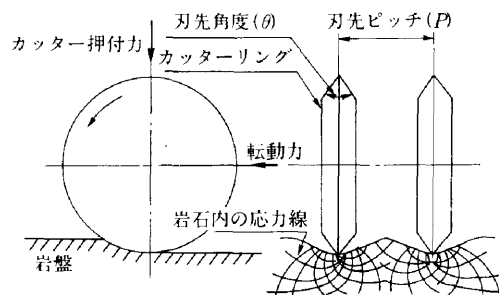


Fig.13 岩破碎の概念図

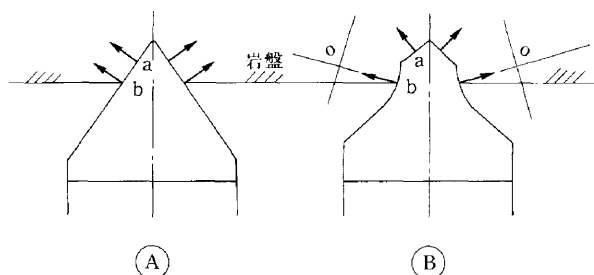


Fig.14 刃形別による力の作用方向

生させ、表面から岩を剥離させてゆくのである。そのメカニズムの要素として考えられるのが、刃先ピッチ・刃先角度・転動力・押付力である。刃先ピッチ・刃先角度については先に述べたので、転動力及び押付け力について考えると、この二点を大きく左右するのが刃の形状と考えられるのである。岩盤がある程度大きなものでは剥離するまでにカッタは岩盤に食い込んだ状態になることが、TBM の切羽に刃先の残した溝が同心円状になっていることから判断できる。そこで、刃先がある程度岩盤に食い込んだ状態での力の作用方向を Fig. 14 に示す。刃形①のような単一面だけの場合は、a 点でも b 点でも同一方向にしか力が作用しないが、刃形②は直線と曲線の組み合わせによる面で構造されているために a 点と b 点では力の作用方向が異なる。図の様な状態になるまでにある程度岩盤に亀裂を生じさせているならば、岩盤の表面近くで剥離しやすいように掘起す力を与える方が有効と思われる。従って、当研究において刃形②を採用した訳だが、比較実験を行っていないため、実証実験による裏付けが必要であろう。

§ 5. まとめ

TBM 工法はさらに苛酷な条件が加わり需要が増大

するであろうが、残された課題は大きく多くのものがある。硬岩を技で制するか？力で制するか？また形か機構かなど未知の魅力をどのような形で表現できるかが技術者の最も感心をよせるところである。材質の開発から加工技術、熱処理、機構、シール技術などそれぞれの専門技術者の知識のまとめ、協力体制など包括的なまとめや、岩盤破碎のメカニズムの解明なども根本的な課題である。その他に破碎帯、粘性土複合地盤などの施工法にも適する工夫をしなければならない。

本研究は時間的な制約などがあり充分なものとは云えないが奥深いTBM工法の入口に入ったものと勝手に理解しており、さらに奥に分け入るための研究努力をしなければならないであろう。

本研究に多大の御理解を頂いた。施工本部長をはじめ現場関係の皆さん、協力下さった専門技術者の皆さんに感謝すると共に、豊富な知識と技術を今後の研究開発のために御提供下さることをお願いして、報告の締めと致します。