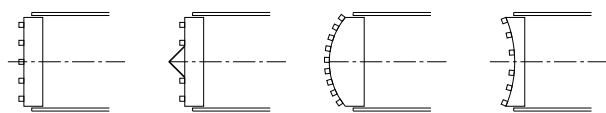


図-2 泥濃式破碎型推進工法概要図

2. 破碎型掘進機のカッタ形状

推進工法に使用される破碎型掘進機のカッタ形状として、4つに大別される。以下にそれらの形状と特性について述べる⁴⁾。また、図-3にその形状を示す。



(1)面盤 (2)スポーク (3)ドーム (4)すり鉢

図-3 カッタヘッドの形状

(1) 垂直平形：面盤タイプ

泥水式シールド工法、泥水式推進工法に多く用いられている。カッタビットは切羽崩壊防止の役割を主目的に面盤が装備されているため、掘削土砂の取り込み制限を余儀なくされ、破碎効果は制約を受け易いが、ビットの保護の観点からは適している。そのため、押し付け力の増加により破碎効率の向上を図る場合が多い。また、面盤開口率が非常に少ないため、粘性土地盤を含む複合地盤の施工では開口スリットの閉塞現象が発生しやすい。

(2) 芯抜き形：スポークタイプ

泥土圧シールド工法、泥濃式推進工法に多く用いられている。切羽開口率が大きいので、チャンバ内の土圧を切羽に容易に伝達できる。基本的に粘性土～砂礫層までの対応が可能であるが、硬質地盤の場合はローラビットの取り付け位置の制約や最外周への抵抗増加が懸念されるセンタ駆動方式では注意が必要である。よって、主軸・アームのボア径の大口径化やアーム本数の増加により補い、硬質地盤に対応しなければならない。

(3) ドーム形

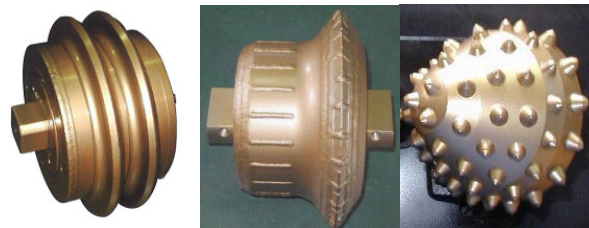
TBM工法、シールド工法の巨石層や岩盤に多く用いられている。特に硬質地盤に適用される場合が多い。ドーム型ゆえに最外周部側面までディスクカッタを設置することが可能な利点があるが、推進工法への適用は、掘削破砕片が掘削余掘部に残置されやすくなり、周辺摩擦の増大を招きやすいため不向きである。

(4) すり鉢形：カッタ単体タイプ

一般的にダウンザホール工法や小口径泥土圧推進工法、泥濃式推進工法に用いられる。片持ち固定によるビットを突出した状態のカッタ構造とし、中心部に向けて、すり鉢状にビットを配置し、ビット自体の破碎効果を高める。片持ち固定となるため、カッタ台座の固定方法を工夫する必要があるが、多数のビットを直接破碎面に作用させると同時に、衝突破碎も期待できるため、破碎効果が高い。

3. 破碎型掘進機のカッタ仕様

破碎型カッタビットの種類には、ディスクカッタ、チップインサートカッタ、コーンカッタなどがある。以下にその特徴を示す。また、それらのカッタ形状を写真-1に、各々の破碎メカニズムを図-4に示す⁵⁾。



(1)ディスク (2)チップインディスク (3)チップインコーン

写真-1 カッタビットの形状

(1) ディスクカッタ

鋭角な鋭い刃先により、巨石や岩盤面を切削し、その切削跡にディスクカッタ本体斜面を押し当てて強い押し付け力とカッタの回転力により破碎する構造となっている。よって、破碎面は後方からの大きな推進力やカッタトルクおよび地山の支持力が必要となる。

(2) チップインサートディスクカッタ

ディスク表面に超硬チップを埋め込み、鋭角な鋭い刃先とインサートされた超硬チップにより、巨石や岩盤面を切削し、その切削跡にディスクカッタ本体斜面を押し当てて強い推進力とカッタの回転力により破碎する構造となっている。したがって、ディスクカッタより押し付け力は若干小さくなるため、対象地盤の適用範囲は拡大される。

(3) チップインサートコーンカッタ

コーン状のカッタ表面に超硬チップを埋め込み、破碎面に複数のチップを点載荷させ、表面剥離を促進し、大割れさせた後に破碎を進行させる。そのため、極端な押し付け力を必要とせず、破碎効果を最大限に高めることができる。また、カッタ本体がコーン形状のため玉石層では自由断面ができ、大割後の破砕片同士の衝突破碎が期待できる。

4. カッタ転送距離ライフ（ビットライフ）

上述の通り、ディスクカッタとチップインサートカッタとは、破碎メカニズムが異なるため、各々の特性に応じたビット転送距離を求める必要がある。また、使用する超硬チップの形状や対象地盤のモース硬度にも大きく左右されるため、それらの諸条件に応じたカッタ転送距離ライフの設定が必要となる。

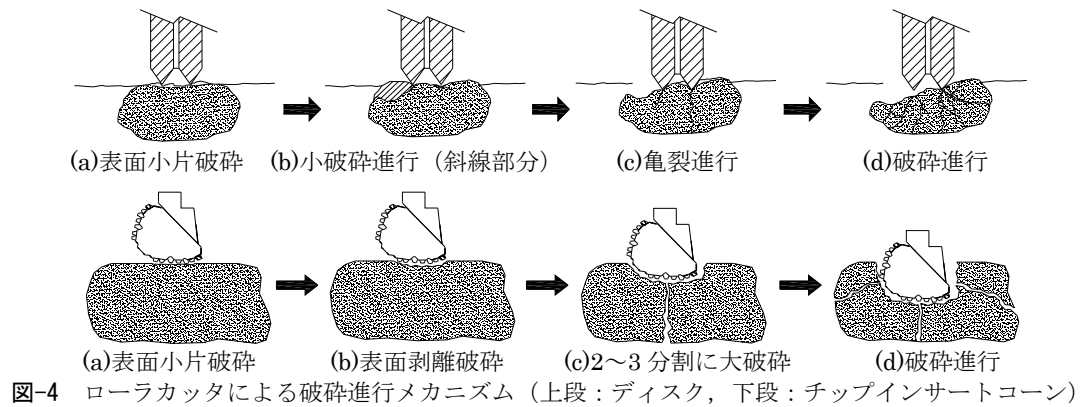


表-1にチップ形状別の特性を示す。また、表-2に造岩鉱物のモース硬度を表-3に各岩石毎の標準的鉱物構成の一覧を示す⁶⁾。

チップ形状については、対象地盤の種類や一軸圧縮強度により、チップ硬度を選定し、地盤の特性に応じたチップ形状を選択する必要がある。下表に示すとおり、切込み量が多くなると転送距離が短縮されるが、その分チップへの消耗も大きくなる。また、地盤によっては、チップの欠損を招くこともあるため、注意が必要である。

カッタ転送距離ライフについては、表-2、3に示すとおり、モース硬度6以上の長石・石英を多く含有している岩石についてはビット磨耗度が激しいため、慎重なカッタ転送距離ライフの設定が求められる。特に、一般的に日本に広く分布している花崗岩についてはビット磨耗が非常に激しく、その磨耗度は緑色片岩と比較して3倍程度との報告もある⁶⁾。

また、類似した花崗岩の中でも石英と長石の硬度のバラつきが大きく不均一性が非常に強い岩石については、一軸圧縮強度のみに頼ったカッタ転送距離ライフの設定は危険である。

巨石・玉石については、一軸圧縮強度と玉石径によって評価されるのが一般的であり、石自体の成分の評価は行っていないのが実体である。

表-1 チップ形状別の特性

チップ形状	イメージ	特徴	※切込み比
ボール型		切込み深さについては最も少ないが、ビット欠損が少なく耐摩耗性に優れている	1.0
チゼル型		切込み深さは中間に位置し、衝撃破砕に有効なため、巨石・玉石に適している	1.5
二段円錐型		連続性の高い切削が期待できるため、時間当りの切込み量は秀でているが、ポイントロードのため、先端部磨耗は早く高硬度のものが望まれる	2.0

※ボール型を1.0とした場合の切込み深さの比

表-2 造岩鉱物のモース硬度

標準鉱物	英文名	化学組成	硬度
滑石	talc	$Mg_3(OH)_2(Si_4O_{10})$	1
石膏	gypsum	$CaSO_4 \cdot 2H_2O$	2
方解石	calcite	$CaCO_3$	3
螢石	fluorite	CaF_2	4
燐灰石	apatite	$Ca_5F(PO_4)_3$	5
正長石	orthoclase	$K(AlSi)_3O_8$	6
石英	quartz	SiO_2	7
横玉	topaz	$Al_2(F,OH)_2(SiO_4)$	8
鋼玉	corundum	Al_2O_3	9
金剛石	diamond	C	10

表-3 岩石中の鉱物構成

岩石名		鉱物構成%			
		モース硬度			
		7	6	5	4以下
火成岩	花崗岩 (流紋岩)	25	67	3	5
	閃長岩 (粗面安山岩)		95	3	2
	花崗閃緑岩 (石英安山岩)	21	74	2	3
	石英閃緑岩	20	74	2	4
	閃緑岩 (安山岩)	2	90	3	5
	斑レイ岩 (玄武岩) / 輝緑岩		96	3	1
	角閃石岩 / 輝岩		100		
	蛇紋岩		20		80
堆積岩	珪質砂岩	95			5
	アルコース	55	40		5
	グレイワッケ	45	40		15
	頁岩・泥岩		10		90
	シルト岩	30			70
	石灰岩・ドロマイト / チョーク・マール				100
	チャート・フリント	100			
変成岩	粘板岩, 千枚岩	10			90
	片岩 (雲母質)	10	30		60
	緑色片岩	10	20		70
	片岩 (石英質)	20	10		70
	花崗片麻岩	25	67	3	5
	角閃岩, グリーンストーン		95		5
	大理石				100
	ホルンフェルス		90		10

以上の標準的な指標から、掘進速度を想定し、掘削距離ライフの算定を行う。次式に掘削時間ライフ・掘削距離ライフを示す。また、その計算例を表-4・5に示す。

- 掘削時間ライフ(h)

$$Lh = \frac{1000 \times \lambda}{2\pi \cdot rm \cdot n \cdot 60} \quad (1a)$$

- 掘削距離ライフ(m)

$$Lm = Lh \times V \quad (1b)$$

λ : カッタ転送距離ライフ (km)
rm : 最外周カッタ回転平均半径 (m)
n : カッタ回転数 (rpm)
V : 平均掘進速度 (m/h)

表-4 アウトプット例① φ 800mm qu=50MPa

最外周カッタ回転平均半径(m)	0.525
カッタ回転数(rpm)	4.3
平均掘進速度(mm/min)	13.5
平均掘進速度(m/h)	0.8
カッタ転送距離ライフ(km) 緑色片岩	1000
掘削時間ライフ(h)	1175
掘削距離ライフ(m)	952

表-5 アウトプット例② φ 800mm qu=150MPa

最外周カッタ回転平均半径(m)	0.525
カッタ回転数(rpm)	4.3
平均掘進速度(mm/min)	5.06
平均掘進速度(m/h)	0.3
カッタ転送距離ライフ(km) 花崗岩	500
掘削時間ライフ(h)	588
掘削距離ライフ(m)	178

5. 施工現場検証

(1) 施工例①

本工事は、岩手県盛岡市内の北上川流域において、合流式下水管渠を埋設する工事であった。この一帯は名水百選にも選ばれた湧水が常時噴出しており、その泉水が計画路線上に近接し、輻輳した既設埋設物とわずかな離隔を介して推進を行うため、高度な施工管理（逸泥管理）が要求された。

また、そのような条件下では、補助工法としての圧気工法の漏気や薬液注入工法の地中拡散が禁止されており、機内交換や中間貫通立坑の設置が不可能と考えられた。よって、772mという長距離の巨石混入地盤で、ビット交換を行わずに到達させる対策が求められた。以下に施工概要を示す。また、写真-2 に使用した掘進機を示す。

- 管呼び径：φ 1, 100mm
 - 推進延長：L=772.15m（中間立坑無し）
 - 推進土質：玉石砂礫層（最大礫径=330mm）
- ※下流工区にて長径φ 600mmの玉石を確認

- N 値=23~33、礫率=58~67%
- 透水係数=1.0×10⁻⁰~10⁻²cm/sec
- 曲線条件：300R+500R+500R+500R+500R+75R+125R+110R 計 8 カーブ
- 土被り：3.55~6.34m

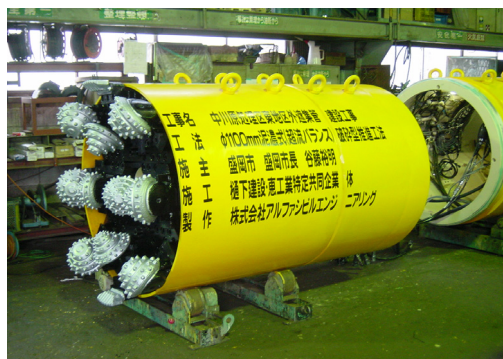


写真-2 φ 1, 100mm破砕型掘進機全景

施工条件から、巨石地盤でビット交換をせず長距離施工を効果的に破碎するために、チップインサートコーンカッタを採用した。また、チップ側面からの巨石層の衝突力によるチップの欠損を防止するために、粘りのあるチップ硬度（E5）を採用した。また、チップ形状は巨石地盤に適したチゼルチップを多用した。表-6に掘削距離ライフの算定を示す。巨石層においては、前述のとおり、一軸圧縮強度と玉石径により磨耗度が左右され、岩盤層と違い玉石同士の衝突破碎効果が期待できる。また、排土機構もφ 350mmと大きいため、面盤方式に見られる切羽面での全破碎は不要となり、大割した状態での取込が可能となり、ビット延命が図られる。よって、以上のことからカッタ転送距離ライフを1000kmとし評価を行った。

表-6 φ 1100mm 巨石層

最外周カッタ回転平均半径(m)	0.7
カッタ回転数(rpm)	2.9
平均掘進速度(mm/min)	16.2
平均掘進速度(m/h)	0.972
カッタ転送距離ライフ(km) 玉石・巨石	1000
掘削時間ライフ(h)	1307
推進延長(m)	772.15
掘削距離ライフ(m)	1270

当初設計の通り、摘出された玉石から想定すると400~500mm がほとんどであった。到達時の掘進機ビット状況は、チップの欠損はなくカッタ本体のベアリング等の破損もなく施工を完工することができた。ただし、チップ周辺の母材には大きな磨耗が見られ、一つひとつのチップがむき出しになっているものも見受けられた。

このことは、チップの切り込み量が予想以上に大きく玉石片が直接母材に接触したことにより発生したものであると想定されるが、母材磨耗の極端な進行はチップの脱落を生む可能性が高いため母材の焼き入れや硬度についても十分な注意が必要である。

写真-3 に掘進機回収後のビット状況を示す。

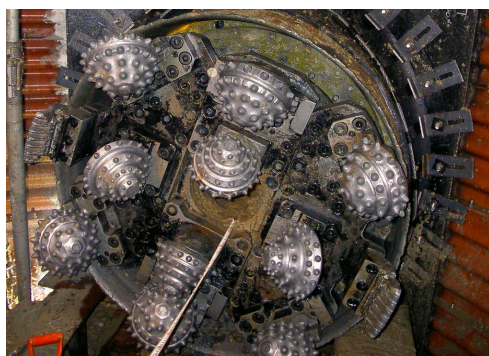


写真-3 掘進機到達状況

(2) 施工例②

本工事は、広島県東広島市において下水道幹線整備工事の一つとして施工するものであった。この東広島地区の地形は、全国的に見ても花崗岩丘陵地として有名で、本現場においては部分的に基盤岩が隆起するような地形で構成されていた。特徴としては、黒雲母花崗岩、花崗閃緑岩で節理や亀裂および岩目が少なく風化変質が少ない地盤であった。

本現場の花崗岩の特性に関しては、石英・長石・黒雲母を多く含み、ビット摩耗を著しく促進させる物質である。特に広島花崗岩は白亜紀後期（6500万年以前）に形成されていることから、非常に硬度が高く花崗岩バソリスと呼ばれており、露出面積は100km²に及ぶ箇所もある。

本工区の路線に関しては、地質図から判断すると傾斜地で硬質の流れ盤が存在する可能性も有し、掘進後のテールボイドへの亀裂破砕片の混入とそれに伴う急激な周辺摩擦力の上昇も懸念材料の一つと考えられた。

事前のボーリング調査結果から、推進対象路線には、このような花崗閃緑岩（40～150MPa）がスパンの半分以上を占める施工であることから、ビット寿命が最大の課題であった。また、施工路線上は住宅地かつ通学路であり、中間貫通立坑の構築が困難と判断されたため、岩盤層を1スパン、ビット交換なしで掘進する対応が求められた。以下に施工概要を示す。

- ・ 管呼び径：φ800mm
- ・ 推進延長：L1=570.836m, L2=256.932m（ビット交換立坑無し）
- ・ 推進土質：花崗岩閃緑岩（一軸圧縮強度 56～159MPa）
- ・ N値=50以上
- ・ 曲線条件：L1：1000R+1500R+100R+90R
L2：100R+90R+300R
- ・ 土被り：8.44～11.19m

以上の施工条件から、花崗閃緑岩で長距離推進するためのビット配置やチップ形状の検討を行った。まず、長距離推進における岩盤破砕片の掘削余掘部への残置による周面摩擦力の増加を防止するために、すり鉢形とし、破砕片を中心の排土ラインに集積す

る方法を採用した。また、チップインサートコーンカッタを従来のものよりも RC285 と大型化し耐磨耗性の向上を図った。

花崗岩を掘進する際の特徴としては、破碎の進行が少なく大割れせずに表面破碎が中心となる。そのため、チップについては少ない点載荷で硬質地盤の表面剥離を促進できる二段円錐チップを多用し、最外周部には耐磨耗性に優れたチゼルチップを配置した。また、チップの硬度は E4 を採用した。これらの仕様変更に伴い、花崗岩における許容カット転送距離ライフを従来の 500km から 600km まで向上させることが可能であると判断した。表-7 に掘削距離ライフの算定を、写真-4 に使用した破碎型掘進機を写真-5 にチップインサートコーンカッタを示す。

表-7 φ800mm 岩盤層

最外周カット回転平均半径(m)	0.51
カット回転数(rpm)	4.3
平均掘進速度(mm/min) 風化～未風化花崗岩	16
平均掘進速度(m/h)	2.01
カット転送距離ライフ(km) 従来の1.2倍	600
掘削時間ライフ(h)	726
推進延長(m)	570.836
掘削距離ライフ(m)	697

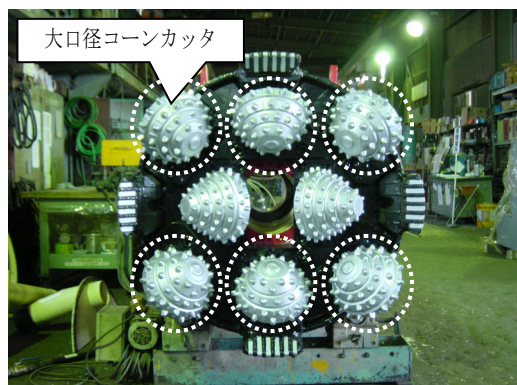


写真-4 破碎型掘進機正面



(チゼル・二段円錐型)

写真-5 チップインサートコーンカッタ

写真-6 に到達状況を示す。掘進機回収後の立坑上での確認では、二段円錐チップは最大 8mm、平均約 6mm の摩耗となっていた。特に、ローラビット本体は最外周のゲージカッタのチップ摩耗が激しく、

現場での残り中硬岩推進余裕長は、50m 程度と推測された。

回収後の工場での検証では、全てのカットにおいて片減り、回転不能、回転ブレ等は確認できなかった。しかし、一部のカットでベアリング内に泥水が浸入した痕跡があった。また、今回本掘進機には運転時間を計測するためのカウンタ装置が装備されていたため、カウンタ数から運転時間を調査した。表-8 に転送距離ライフの実績表を示す。この結果、当初想定していたカット転送距離ライフ 600km を遙かに超えた 1,000km 以上の実績となっている。ただし、この転送距離については、無負荷稼働時間があるため、それを差し引くと 90% の 900km 程度と判断している。

表-8 転送距離実績表 (L=570.86m スパン)

掘進機外周長	3.30m
カッター運転時間	1,268.4 時間
	76,104 分
カッター回転数	327,247 回転
転送距離	1,079,481m

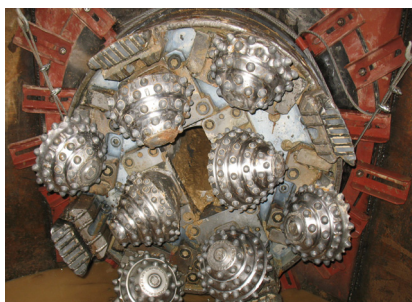


写真-6 掘進機到達状況

6. まとめ

本稿ではまず、推進工法の中でも特に多く適用されている泥濃式推進工法に着目し、今後、益々増加されると考えられる硬質地盤での施工において、現状使用されている掘進機のカッターやビット形状について再確認を行った。カッターの形状の違いについては、破碎メカニズムが異なることから、それらの特

性に応じて選別する必要がある。次にチップの形状においては、過去の実験データから切り込み量の深さが検証されており、地盤特性に応じ、形状だけでなく、チップ硬度や母材硬度にも配慮する必要がある。特に、日本に広く分布している花崗岩については、一軸圧縮強度のみの評価は困難であり、モース硬度の高い長石・石英の含有率を踏まえ、硬度のバラつきも配慮した評価が必要である。

実際の現場の検証においては、カット転送距離ライフよりも余裕がある状況ではあったが、部分的に偏磨耗しているものも見受けられたため、さらに検証が必要である。また、検証記録としての掘進機に装備されたカウンタ装置により、運転時間を調査することができたが、無負荷時と過負荷時（掘進時）の時間が明確に把握することができないため、今後は計測方法を踏まえ、検証する必要があることが分かった。

謝辞：最後に、本破碎型掘進機の開発および今回の施工事例に関係する発注者各位・元請各位をはじめ、関係者各位の皆様にご指導やご協力を頂いたことに書面をかりて心から謝意を申し上げる。また、これからも推進工法のさらなる発展において末永くご指導、ご教授をお願い申したい。

参考文献

- 1) (公社)日本推進技術協会：推進工法体系 I 推進工法技術編 2013 年版, p.6, 2013.
- 2) 超流セミシールド協会：超流バランスセミシールド工法設計指針・積算要領 (案) 平成 18 年度版, 2006.
- 3) 厚生労働省労働基準局通達：「推進工法によるずい道建設工事における労働災害防止対策の徹底について」, 2014.
- 4) 土木工学社：シールドトンネルの新技术, p.43, 1995.
- 5) (有)日本プロジェクト・リサーチ 第 24 回「シールド工法講習会テキスト」濱田和人：巨礫層におけるシールド工事について, p.38, 1985.
- 6) (有)日本プロジェクト・リサーチ 第37回「シールド工法講習会テキスト」勝沼清：巨礫・岩盤層掘削シールドの計画と実績, p.4-5, 1993.

STUDY ON BIT WEAR FOR HIGH DENSITY SLURRY PIPE JACKING CRUSHER TYPE MACHINE THROUGH A HARD GROUND PIPE JACKING

Fumihiko MATSUMOTO, Tomo MORITA, Hideki SHIMADA

In recent years, the development of pipe jacking technology is remarkable. High density slurry pipe jacking method, one of the pipe jacking technologies, has a number of achievements for life-line construction, such as sewer pipelines and electrical pipelines. However, since the infrastructure development of the sewer are becoming established in urban areas, the development of the mountainous areas and regional cities has been increasing. So excavation ground changes from silt or clay soil layer to the bedrock, boulders layer. And change of soil condition makes pipe jacking construction severer.

This paper introduces the type of face plate and cutting bits and shows the bit wear situation through the hard ground, such as hard rock layer and big cobble ground, construction cases in high density slurry pipe jacking crushing type machine.