

大断面TBMによるトンネル施工 Tunneling by Large Tunnel Boring Machine

亀山 克裕*

Katsuhiko Kameyama

要 約

東海北陸自動車道飛驒トンネル工事は、延長約 10.7 km の長大トンネルを施工するものであり、平成 9 年 12 月に着手し 8 年が経過する。掘削は、白川方より TBM 工法、河合方より NATM で両坑口から行われている。本稿では、TBM 掘削が開始された平成 16 年 1 月から平成 17 年 12 月までの施工実績と、カッタヘッドに搭載されたディスクカッタに偏磨耗が発生した事象について、その原因の考察をとりまとめた。

目 次

- § 1. 概 要
- § 2. TBM (トンネルボーリングマシン) の概要
- § 3. 施工実績
- § 4. ディスクカッタの偏磨耗
- § 5. ま と め

§ 1. 概 要

1-1 工事概要

本工事は、東海北陸自動車道と中部縦貫道が連結する飛驒清見 JCT と白川 JCT 間の延長 25 km 区間に位置する。飛驒トンネルは、その主役をなす延長 10.71 km の長大高速道路トンネルである。白川方トンネル坑口東側は、ユネスコ世界文化遺産に認定された白川荻町合掌集落に隣接している。このトンネルが完成すれば、関越自動車道関越トンネルに次ぐ国内 2 位、世界では第 8 位の道路トンネルとなる。図-1 に工事位置図を示す。

- (1) 工 事 名：東海北陸自動車道飛驒トンネル工事
- (2) 発 注 者：中日本高速道路株式会社
- (3) 工事場所：岐阜県大野郡白川村～飛驒市河合村
- (4) 工 期：

平成 9 年 12 月 27 日～平成 13 年 3 月 10 日 (その 1 工事)

平成 13 年 1 月 31 日～平成 16 年 2 月 29 日 (その 2 工事)

平成 15 年 12 月 18 日～平成 17 年 9 月 17 日 (その 3 工事)

平成 17 年 7 月 5 日～平成 19 年 10 月 22 日 (その 4 工事)

- (5) 施工形態：大成・西松・佐藤共同企業体

- (6) 工事内容：

工事延長 L=10,710 m (トンネル掘削)

内訳 白川方 NATM：2,945 m, TBM：4,500 m

河合方 NATM：3,265 m



図-1 工事位置

掘削断面	NATM：81～152 m ² , TBM：130 m ²
掘削方式	白川方 発破/機械, 河合方 発破
運搬方式	白川方 タイヤ式/ベルトコンベア (TBM) 河合方 タイヤ式

1-2 地質

本トンネルを構成する地質を大別すると、図-2 に示すように白川方から白川花崗岩・濃飛流紋岩・花崗斑岩・飛驒変成岩が分布する。また、当トンネルは、日本でも有数の活断層である跡津川断層系と御母衣断層系の近傍に位置し、両断層系からの派生断層がトンネル掘削断面に出現する。

§ 2. TBM (トンネルボーリングマシン) の概要

2-1 TBM 諸元

本トンネルでは、オープン型 TBM とシールド型 TBM の長所を融合させた改良オープン型 TBM を採用している。この特徴として、グリッパとスラストジャッキによるグリッパ推進、および不良地山では TBM 後胴内にて組立てた全周ライナから推進反力を得るシールド推進の 2 種類の推進方法が選択できる。表-1 に TBM

*中部 (支) 水広下 (出) (元 飛驒トンネル (出))

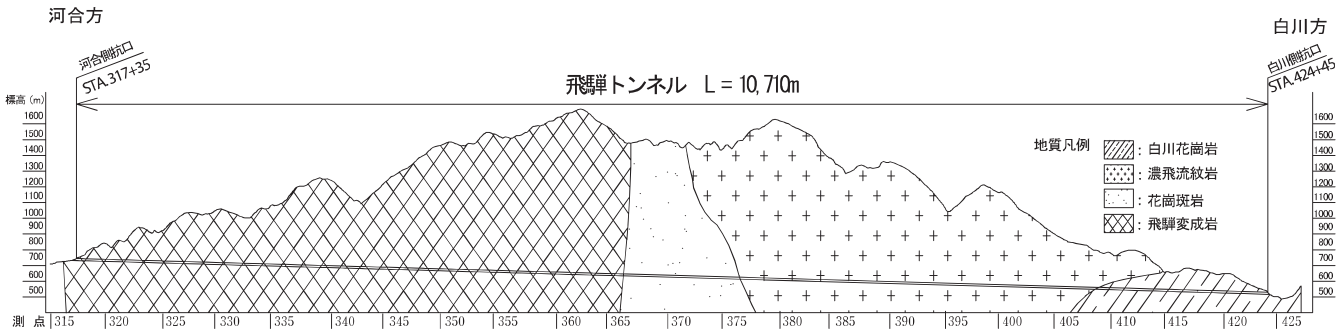


図-2 トンネル縦断面図

表-1 TBM 諸元

機種	改良オープン型 TBM
標準掘削径 (mm)	12,840
本体長さ (mm)	19,500
機械全長 (後続台車含) (mm)	170,500
総出力 (kW)	5,850
カッタヘッドトルク (kN・m)	10,053~31,373
ディスクカッタ径 (インチ)	19 (483 mm)
ディスクカッタベアリング許容荷重 (kN)	314
ディスクカッタ刃先形状	平型
ディスクカッタ装備数 (個)	88
カッタヘッド回転数 (rpm)	0.4~4.0
スラストジャッキストローク (mm)	2,000
補助推進ジャッキストローク (mm)	1,150
推進速度 (mm)	0~40
スラスト推力 (kN)	33,320
補助推進推力 (kN)	55,370
掘削ズリ搬送能力 (ton/hr)	1,200

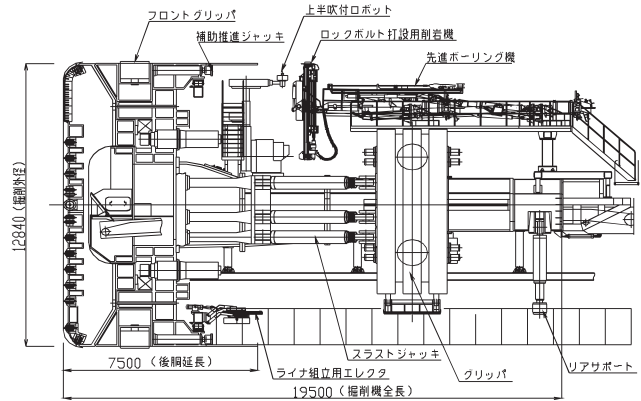


図-3 本体縦断面図

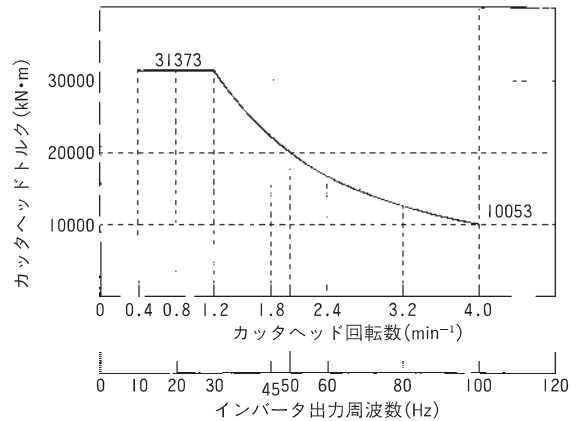


図-4 カッタヘッド出力トルク

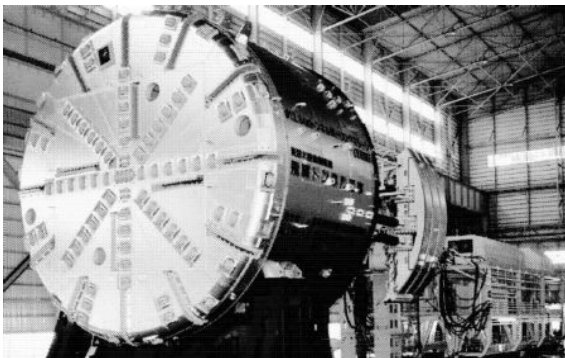


写真-1 TBM 本体写真

諸元, 写真-1 に TBM 本体写真, 図-3 に本体縦断面図を示す。

2-2 カッタヘッド駆動装置

駆動装置には, インバータ制御された水冷式電動モータが採用されている。始動電流を低くし, 徐々に定格回転速度まで上げるインバータ制御は, 近年の TBM において主流となっているが, この理由として掘削トルクとインバータ特性の相性が考えられる。

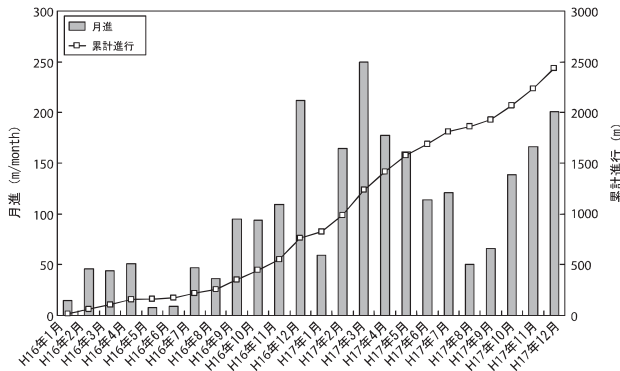
(1) 良好な岩盤掘削時における推進
 硬岩の場合, 岩石の一軸圧縮強度が大きいためディスクカッタの岩盤への貫入量は小さくなる。つまりディスクカッタに作用する背分力¹⁾²⁾は大きくなり, 主分力は小さくなるためカッタトルクは小さくなる。よって, 硬岩において, カッタヘッドは高速回転低トルク環境となる。

(2) 不良地山掘削時における推進
 推進時においてカッタヘッド前方切羽崩壊等により回転抵抗が増大する。また TBM は, 連続ベルコンによるズリ出しを行うため, その搬送能力を超えないズリの取り込み制御としてカッタヘッド回転速度を小さくする。よって, 不良地山において, カッタヘッドは低速回転高トルク環境となる。

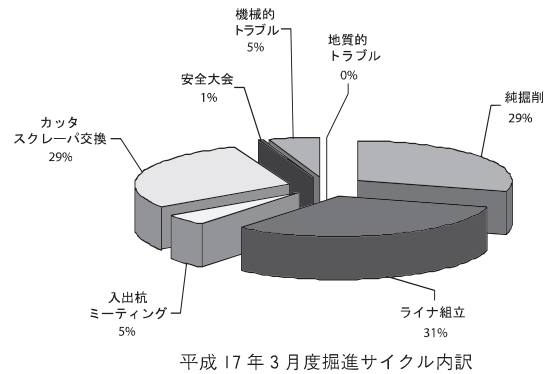
図-4 にカッタヘッド出力トルクを示す。トルクは回



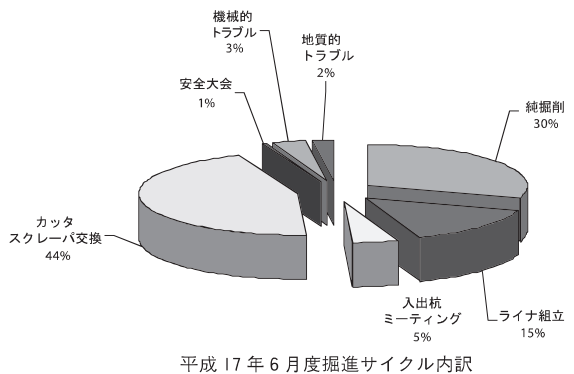
写真一 19インチディスクカッター



図一 進捗状況



平成17年3月度掘進サイクル内訳



平成17年6月度掘進サイクル内訳

図一 掘進サイクル内訳

表一 掘進サイクル

年月	月進行 (m)	ストローク数 (ST)	平均掘進速度 (mm/min)	1サイクル平均時間 (トラブル込) (min)	掘削稼働率 (%)	純掘削時間 (min)	ライナ組立時間 (min)	摘要
平成17年3月	249.6	252	24.20	92.18	29.46	10,316 (29.5)	11,031 (31.5)	(実績比率%)
平成17年6月	114.0	114	11.61	144.32	29.83	9,816 (29.8)	4,830 (14.7)	(実績比率%)

転数 1.2 rpm で最大トルク 31,373 kN・m を出力し、最大回転数 4 rpm では、10,053 kN・m にまで低下するカーブを描くものとなり、回転数の上昇にともないトルクは減少する特性を有する。

2-3 ディスクカッター

TBMに装備されるディスクカッターは、写真一に示す国内においては初めて採用される19インチのものを装備している。一般的に、岩強度および掘削径が大きくなるに従ってサイズの大きいカッターが使用される。その理由として、①サイズが大きいほどベアリングなどの構成部品を大型化できるため、カッター1個あたりの許容荷重を向上させることが可能となる、②カッターサイズが大きいほどカッター磨耗体積（カッター周長×許容磨耗量）を増加させることで、カッター交換回数を低減できる、という利点が挙げられる。しかし、カッターが大型化した場合の欠点として、1個あたりの重量が大きくなりカッター交換時のハンドリングの容易さが低下するので、作業性および岩盤強度等を総合的に判断しカッター径を決定する必要がある。

§ 3. 施工実績

3-1 進捗状況

平成16年1月から平成17年12月における進捗状況を図一に示す。掘削開始から200mは掘削試験施工区間とし、組立完了から休止していたTBMの機械的トラブル・構造上の問題点等の抽出を行い、問題点の改造・改良を行いながらの掘削となった。試験施工区間終了後は地質的トラブルに悩まされ、平成16年10月までは掘削補助工法併用での施工が続いた。その後は、切羽の安定性が向上し、比較的順調な掘削が行われている。平成17年12月末時点での掘進実績では、最大月進249.6m、最大日進15mを記録している。

3-2 掘進サイクル

最大月進を記録した平成17年3月度と、平均月進に近い平成17年6月度を代表的サイクルとして表一に示す。ここで、高圧幹線盛替および連続バルコン延伸の作業時間は、ディスクカッター・スクレーバ交換との並行

表—3 カッタ消費量

年 度	ディスクカッタ消費量 (個/m³)
平成 17 年 3 月	0.00306
平成 17 年 6 月	0.00928

表—4 前方探査平均サイクルタイム

探査 1 回あたりの固定時間				探査深度による変化時間	
準備工	先行削孔	写真撮影	片付け	本削孔	ロッド引抜
(min/回)	(min/回)	(min/回)	(min/回)	(min/m)	(min/m)
52.60	65.30	5.20	33.95	7.56	3.87



写真—3 AGF 施工状況

作業で行われているため作業項目から除外する。

また、両月の掘進サイクル内訳を図—6 に示す。両月を比較すると、純掘削が占める比率は同等であるが、表—2 に示すように 1 サイクル平均時間が 6 月度の方が大きいため、掘削時間は大きく異なる。また、表—3 に示すカッタ消費量が大きく異なることから、代表的なサイクルである 6 月度の掘削形態は、切羽の不安定化による面盤での二次破砕が主となり、結果としてカッタ消費量が増大していたものと考えられる。

表—5 AGF 施工サイクルタイム

項 目 (鋼管径、φ76.3、シリカレジン)		単 位	
1	シフト当り施工本数	P	本 1
	鋼管	L1	m 15.91
	削孔	L2	m 16.21
	改良	L3	m 12.0
1	本当り注入量	Q	kg/本 69.8
	先行削孔時間	B	分/本 26
1	m 当り推進時間	F	分 7
	ポンプ吐出量	q	kg/分 5
準備工	組立 足場	足場組立	分 64
		小計	分 64
	先行削孔	削孔準備	分 8
		測量・マーキング	分 —
		削孔	分 26
跡片付け		分 5	
小計	分 39		
打設工	削孔準備	分 8	
	削孔	分 103	
	跡片付け	分 12	
	小計	分 123	
注入工	注入準備	分 6	
	口元コーキング・インサート管挿入	分 6	
	パッカー部注入	分 5	
	注入	分 14	
	跡片付け	分 9	
小計	分 40		
そ の 他 損 失		分 17	
計		T	分 219
1	日 当 り 施 工 本 数		4.9

3—3 前方探査ボーリングサイクル

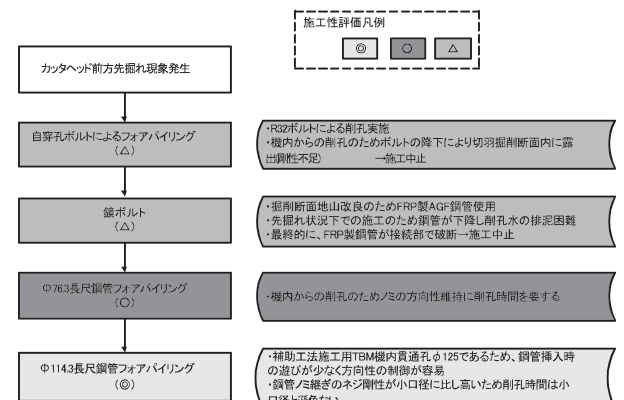
TBM の掘削に先立ち、前方地質探査を目的としたノンコアボーリングを行っている。カッタ交換と並行作業で実施しているため、表—2 に示す掘進サイクルには現れてこない。また、探査システムは、DRISS (Drilling Survey System) を採用している。当トンネルにおいては、本坑に先行して掘削が行われている先進坑 (飛鳥・鉄建 JV) の地質探査により、不良地山と想定されるゾーンの再探査を目的とし実施しているため、探査時間は通常より長くなる傾向にある。表—4 に 20 回に渡る前方探査の平均サイクルタイムを示す。ここで、準備には探査を行うための作業ステージの組立・解体時間およびツールの準備時間を含む。

3—4 補助工法

(1) AGF 工法 (注入式長尺鋼管フォアパイリング)

亀裂密集帯において実施した AGF 工法の施工実績を以下に示す。注入材は、地山状況に応じセメント系・レジン系・アクリル系を用いて地山改良を行った。また、削孔には ROTEX OY 社のリングロストビットシステムを採用している。写真—3 に AGF 施工状況を、表—5 にシリカレジンを注入した際のサイクルタイムを示す。

また、補助工法として、AGF を採用するに至った経緯を図—7 に示す。各補助工法はすべて TBM 機内より施工するため、削孔時の方向性維持が非常に困難であった。一般に、山岳トンネルで補助工法を採用する場合、岩盤の強度低下に起因する掘削断面の自立性低下を補助することを目的とする。しかし、当トンネルの岩盤は硬



図—7 フォアパイリング採用経緯

質ではあるものの亀裂が密集し破碎されているため、切羽の自立を補助するために採用された。

(2) カッタヘッド拘束時崩落対策工

掘削時において、6回に渡りカッタヘッド前方において切羽崩壊が発生しカッタヘッドを拘束する事態となった。切羽崩壊状況を写真-4に示す。切羽前方の崩落土により回転不能となったカッタヘッドの起動時負荷を低減させ、再起動するための施工フローを図-8に示す。



写真-4 切羽崩壊状況

① 切羽前方鏡吹付モルタル

崩落したカッタヘッド前方切羽は、先抜けが2~3mに達し不安定な切羽状況を呈しているため、鏡吹付モルタルにて天端および鏡面の安定を図る。吹付モルタルは中小断面TBMの一次覆工で採用されている短繊維(ビニロンファイバー)がプレミックスされたものを使用している。しかし、従来品は強アルカリ性急結剤であり手狭なところでの取り扱いに注意を要するものであったため、弱酸性液体急結剤に改良したものを使用した。

② 前方崩落土改良

カッタヘッド前方に崩落した岩塊を固結するため、崩落土上部からの低粘度シリカレジンによる浸透注入を行った。しかし、崩落土量によって、上部からの浸透注入のみでは下部の固結が不完全となる場合は、カッタヘッド内より崩落土へSGP-15Aクラスのパイプを打込み、その注入パイプから薬液注入を実施した。また、薬液はシリカレジンとして国内で流通するものの中で、最も粘性の低く浸透性に優れたものを採用した。

③ グリッパ反力体構築

支保パターンDタイプの場合、メイングリッパ載荷箇所はRCライナ設置区間となる。RCライナ背面は豆砂利のみの充填であるため、直接グリッパを載荷した場合、ライナの変形が著しい。そこで、表-6に示すLW薬材を用いた注入にて豆砂利の空隙充填を実施した。また、LW注入材練混ぜプラントは、後続台車にCパターンでの吹付けコンクリートを想定したパッチャプラントが2基搭載されていたため、その内の1つを改造し使用した。

④ TBM 後退工

前方崩落土改良およびグリッパ反力体構築が完了した時点で、グリッパをRCライナに載荷し、TBMスラストジャッキの引き圧力により後退させる。TBM後退を10cm程度行った時点で、崩落土の固結状況をチャンバ内より確認する。固結が十分な場合は、さらに20cm程度の後退を行った後カッタヘッド起動確認を行う。しかし、固結が十分でないと判断される場合は、再度追加注入を実施した後に後退を行う。写真-5にTBM後退後の前方崩落土固結状況を示す。

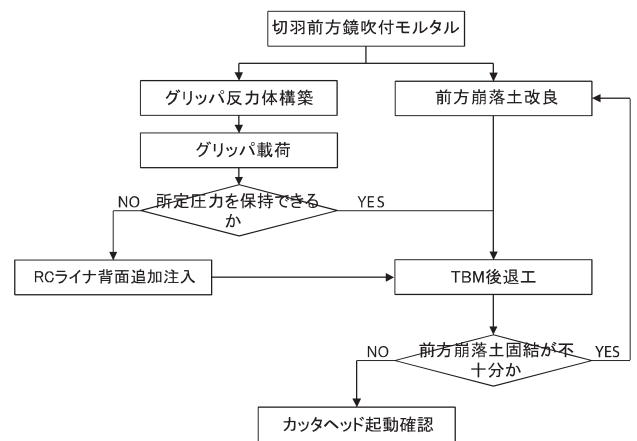


図-8 TBM 再起動施工フロー

表-6 LW 注入材配合表

A 液		B 液	
セメント (kg/m ³)	ベントナイト (kg/m ³)	水 (L/m ³)	水ガラス (L/m ³)
260	110	760	110

(目標 qu=1 (N/mm²))



写真-5 前方崩落土固結状況

§ 4. ディスクカッタの偏磨耗

4-1 偏磨耗の発生

STA. 379+37~STA. 379+30の7m区間を掘削時にカッタヘッドに装備されているディスクカッタに偏磨耗が多発した。そこで、TBMの高速掘進の妨げとなる偏磨耗の原因を究明し、この事象を解決するための第一歩として、TBM機械データに着目し、検討を行った。

4-2 対象箇所地質概略

当該地山状況は、自立性は高く切羽とカッタヘッドはほぼ密着した状態であり、地山にカッタ痕が顕著に残るCH級主体の地山であった。シュミットハンマによる推定強度は335 N/mm²で、切羽は全体的に湿った状況であった。写真-6はSTA. 379+37での右肩部切羽状況である。

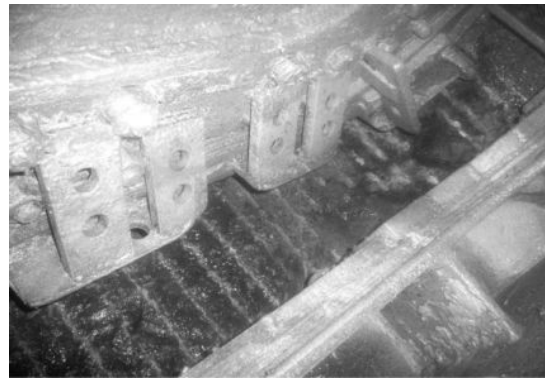


写真-6 切羽状況

4-3 偏磨耗発生箇所

STA. 379+37において、掘削前に所定磨耗量を超えるディスクカッタの交換作業を行ったのち、7mの掘削を行い偏磨耗の発生を確認した。図-9に偏磨耗発生箇所を示す。この図より、カッタヘッド外周部に偏磨耗が集中していることが分かる。また、当該TBMの面盤はドーム型カッタヘッドであり、カッタNo.14までは、ドーム部に位置するものである。ディスクカッタ番号は、最外周から内周へ向けて附番されている。図-10にドーム部カッタプロファイルを示し、図-11に偏磨耗が発生した区間の掘削前に測定したカッタ磨耗量と7m掘削後の磨耗量変化を示す。

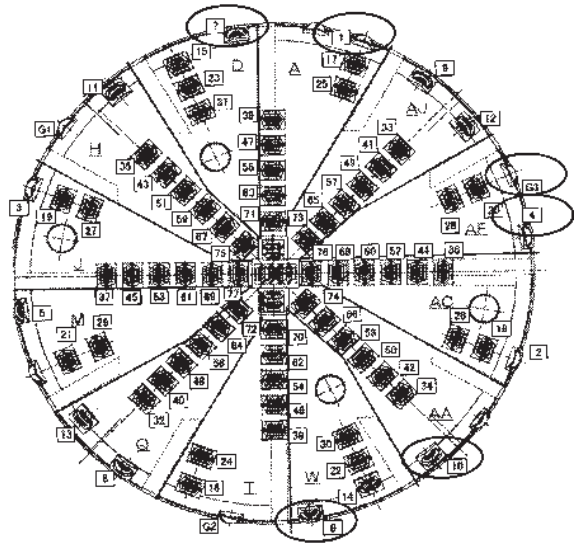


図-9 偏磨耗発生箇所 (○印)

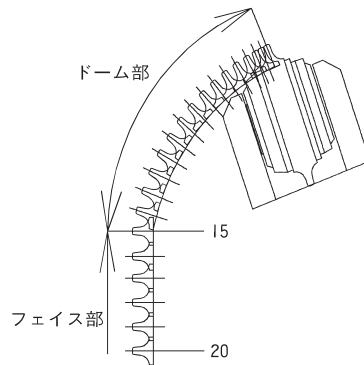


図-10 カッタプロファイル

ここで、カッタ No. G3, 10, 13 は掘削前にカッタ交換を実施したことにより磨耗量は0 mmとしている。

掘削開始前に行ったカッタ交換により隣接するカッタ出しの差が大きくなったことが偏磨耗発生を引き起こす要因と想定し、以下のように考察した。

- (1) G1~G3については1 pass (回転経路が同一)であるため、ゲージカッタにおいてはG3が切羽に最も突出したかたちで掘削が行われた。
- (2) G3に偏磨耗が発生した状態で掘進を継続したことにより、偏磨耗状態の切り溝(カッタ痕)がNo. 1カッタに影響を及ぼした。
- (3) No. 4, 6, 7については、原因は特定できない。
- (4) No. 10については、(1)同様、隣接カッタとの出しの差の関係により偏磨耗を促進した。また、ドーム部カッタは内周部に近づくにつれ取付間隔が広がるため隣接カッタに影響を及ぼすことはなかった。

4-4 機械データとカッタ許容荷重の関係

掘削時に得られた機械データから、ディスクカッタへ作用する荷重を算出し、許容荷重との比較検討を行う。

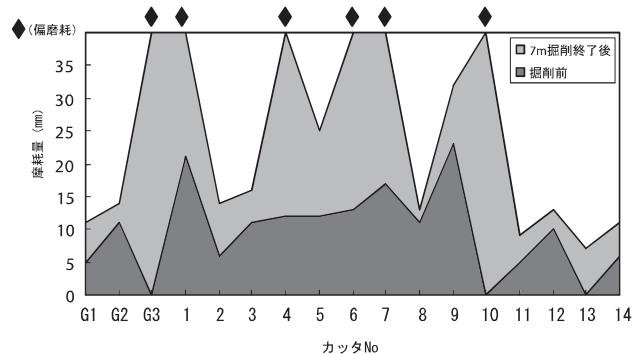


図-11 磨耗状況

TBM製作時の基本仕様を決定するにあたり、以下の式³⁾が一般的に用いられている。

$$T1 = \mu c \times Fc \times Nc \times \sum rc / Nc + T2 + T3 \quad (1)$$

T1：カットヘッドトルク (kN・m)

μc ：ディスクカット回転抵抗係数⁴⁾

$$\mu c = (4/5) \times (Pe/Dc)^{0.5}$$

Pe：ディスクカット貫入量 (mm)

Dc：ディスクカット直径 (mm)

Fc：ディスクカット許容荷重 (kN)

Nc：ディスクカット個数 (個)

Rc：ディスクカット個々の取付半径 (m)

T2：掻揚げトルク (kN・m)

T3：孔壁とカットヘッドの摩擦抵抗 (kN・m)

ここで、表-1に示すTBM諸元を基にT2+T3を950 kN・mと仮定し、(1)式を変形することで、T1とPeの関係を示す(2)式が得られる。

$$T1 = (4/5) \times (Pe/483)^{0.5} \times 314 \times 88 \times 3.55 + 950 = 3570.7 \times Pe^{0.5} + 950 \quad (2)$$

図-12にPe(貫入量)とT1(カットヘッドトルク)の関係を示す。図中、上方に示す近似曲線は(2)式に任意の貫入量を代入して得られたものである。つまり、この近似曲線より上方に掘削時の機械データがプロットされる場合、カット1個あたりに作用する荷重が許容荷重を上回る運転が行われていたことになる。ただし、ここでの条件は、全てのディスクカットが切羽に切込むものとした。また、偏磨耗が多発した原因として、カットに突発的な衝撃荷重が作用した可能性もあるため、許容荷重を0.5倍に評価した近似曲線も同時に示した。これを見ると、ディスクカットの許容荷重を上回る運転は行われていないが、許容荷重の0.5倍を上回る荷重がカットに作用していたことがわかる。

4-6 偏磨耗発生カット状況

取り外したディスクカットの外観確認を行った。偏磨耗が発生した要因として推測される事象には、以下のものが挙げられる。

- ① 許容荷重を超える押付力作用によるベアリング破損
- ② ハブシール材の劣化によるベアリング内への異物進入
- ③ ハブと崩落岩塊の接触による回転軸付近の破損
- ④ カッターリングの材質に起因する破損

ここで、当該区間において偏磨耗が発生したカット状況写真を示す。写真-7がG3カット、写真-8がNo.4カットである。G3カットを確認したところハブシール材の劣化はなく、回転軸付近の破損もなかった。また、回転軸を専用治具にて固定し、カットボディの回転の可否を確認したところベアリングは健全であることが判明

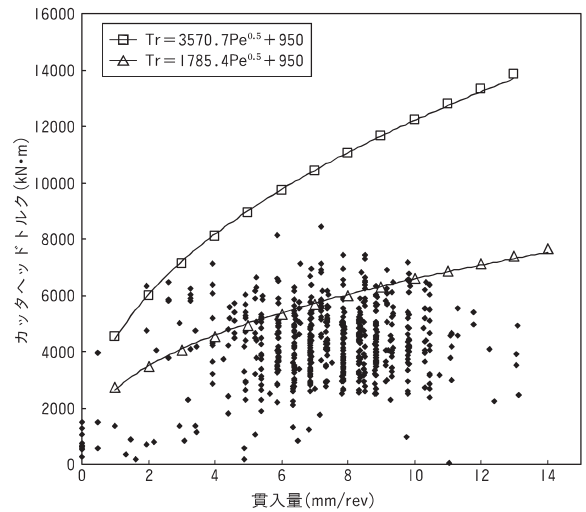


図-12 貫入量-カットトルク図



写真-7 G3 カッタ破損状況



写真-8 No.4 カッタ破損状況

した。つまり、G3カットの偏磨耗の要因としては④の原因を示唆する結果となった。

No.4カットについては、シール材の破損によるベアリング内へ土砂の流入、回転軸付近の破損が確認された。また、G3カットと同一手法にてボディの回転確認を行ったところ回転不能であった。これらの結果より、No.4カットについては偏磨耗に至った要因が複数考えられ、原因を特定することは出来なかった。

今回偏磨耗が発生したすべてのディスクカットを確認した結果、G3カットを除くすべてのカットにおいてNo.4カット同様の偏磨耗形態を示しており、原因の特定までには至らなかった。

4-7 検討結果

偏磨耗が発生した原因を検討した結果、考えられる要因を以下にまとめる。

- ① 外周部カッタは取付間隔が狭いため、1個のディスクカッタが偏磨耗を引き起こすと切羽に残る切削痕が不均一となり、隣接するカッタの刃先が、その切り溝の影響を受け、連鎖的に偏磨耗を増大する可能性がある。
- ② 内周・外周ともに、同一のカッタハブを使用しているが、外周部においてはラジアル力が作用することにより内周部と異なる荷重が発生する。
- ③ カッタ切削時に発生するハブ本体の発熱により、シール材の劣化が促進され、本体内に異物が混入することでベアリングに悪影響を及ぼしている。
- ④ カッタボディは、面盤より切羽に露出した形となるため、ズリとボディが掘削中に接触することで回転軸付近が破損する。

偏磨耗の発生については、複数の要因が考えられるため、主因を特定することは困難である。しかし、上記②について、内周部と外周部ではカッタ取付角度が異なることにより、同様のスラスト力をカッタに作用させた場合、外周部カッタが荷重条件上、不利となることは明白である。よって、外周部に使用するハブは内周部より許容荷重の大きいものを用いる必要がある。

現在流通しているハブはカッタリングのインチ数により許容荷重が決められている。このため、外周部に許容荷重の大きいものを用いる場合、内周よりインチ数が大きくなるが、これは、ディスクカッタの交換頻度を低減させる上においても有利であり、今後 TBM を製作する上で留意する重要な事項であると考えられる。

§5. まとめ

大断面 TBM を用いた濃飛流紋岩という特殊地山掘削時の施工実績、その中でも特に偏磨耗発生時のデータについて着目し、検証を行った。ディスクカッタの偏磨耗については、TBM 施工を行う場合、少なからず遭遇する事象である。しかも、偏磨耗発生によりカッタ交換に要する時間は多大なものとなり、掘削サイクルに及ぼす影響は計り知れない。今後、掘削時に個別のディスクカッタに作用する荷重計測技術を開発することにより、偏磨耗発生メカニズムを解明し、地山状況に応じたマシンスペック最大限での掘削手法を構築する必要があると考えられる。

謝辞：TBM 機械データの着目点についてご指導いただいた東京大学大学院工学系研究科福井勝則助教授、地質に関する資料を提供いただいた(株)地層科学研究所松原誠氏に謝意を表します。

参考文献

- 1) Roxborough, F.F. & Phillips, H.R. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol. 12, 361-366, 1975
- 2) Snowdon, R.A. & Ryley, M.D. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol. 19, 107-121, 1982
- 3) (株)トンネル技術協会：TBM ハンドブック, 114-115, 2000
- 4) Sanio, H.P. : Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr, Vol. 22, 153-161, 1985