

広島型花崗岩におけるT.B.M.シールド機のカタ損耗実績

Cutter Loss Conditions of T.B.M. in Hiroshima Granite

岡田 浩義*
Hiroyoshi Okada

長峰 巖*
Iwao Nagamine

南里 修二*
Shuji Nanri

小山 和秀*
Kazuhide Koyama

要 約

当工事の施工場所は、広島駅より北北東に約10km、広島低地の山流に位置し、太田川左岸に細長く開けた河流氾濫原低地及び丘陵地である。掘削地盤は、石英含有量の多い広島型花崗岩であり、T.B.M.工法（ベルコンタイプ）で、掘削径φ3.150mm、延長1,482mを掘削した際に、カッターリングの割れ、偏摩耗、剥離およびカッターボディの損耗が繰返し発生した。本文は、これらカッターの損耗状況と原因およびその対策について報告するものである。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 工事概要
- § 3. 当工事の問題点
- § 4. T.B.M.シールド機
- § 5. カッターライフ調査検討・対応策
- § 6. カッターライフ結果と考察
- § 7. おわりに

§ 1. はじめに

上流側掘進に於いて、平成8年6月18日のT.B.M.発進後、平成9年4月20日に到達するまで約950mを10ヶ月（再発進立坑築造の為に2ヶ月の掘進停止、従って実働8ヶ月）

下流側掘進に於いては4.5ヶ月を要した。その要因としてベルコン等の機械的故障も挙げられるが、58回を数えるカッタートラブルによる影響が大きい。

本報告は、58回を数えるカッター交換の際に得られたデータからカッターの損耗状況と原因およびその対策についてまとめたものである。

§ 2. 工事概要

2-1 工事概要

工 事 名：深川地区下水道築造7-5号工事
企 業 先：広島市
工 期：平成7年10月5日～平成9年11月28日
工事場所：広島市安佐北区深川三丁目ほか六町

施工位置図を図-1に示す。

*中国(支)深川(出)

2-2 工事内容

(1) シールド工

工事延長 L=1,514.050m
 (上流988.000m+下流526.050m)
 平面線形 R=18m 1カ所 L=17.582m
 R=60m 4カ所 L=362.906m
 R=100m 1カ所 L=83.906m
 R=150m 1カ所 L=342.598m
 合計 L=806.992m
 (曲線率 53.3%)

路線勾配 上流1.5‰ (下り) 下流1.3‰ (下り)
 工法 ハイブリット型T.B.M.工法 (ベルコンタイプ)

シールド機 外径φ=3,150mm, 機長L=6,960mm

一次覆工 L=1,481.650m, 外径φ 2,950mm

セグメント

上流側

一般部 RC 幅1,000mm 数量801R
 曲線部 CP 幅600mm 数量283R

下流側

一般部 ST 幅1,000mm 数量182R
 曲線部 ST 幅600mm 数量234R
 ST 幅300mm 数量63R

リング支保工 H125×125×6.5×9 数量158基

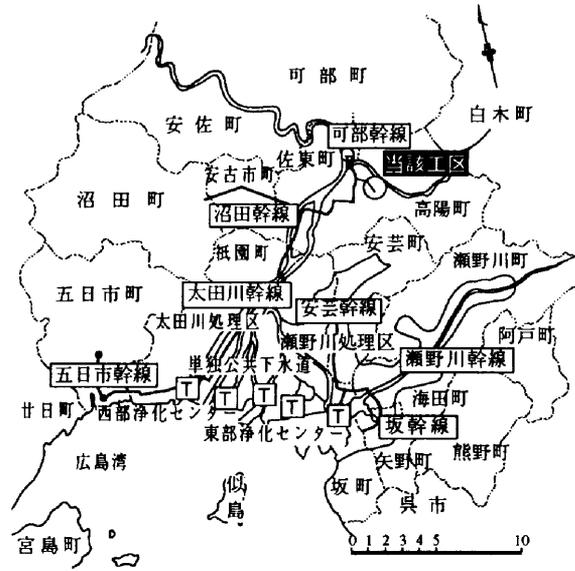
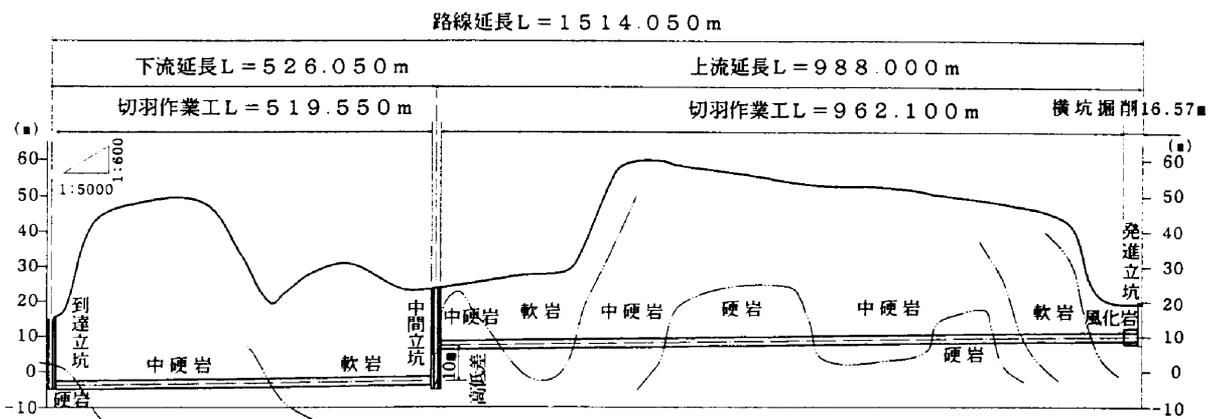


図-1 施工位置図

土質 風化岩, 中硬岩
 $qu = 3.8 \sim 98.1 \text{MPa}$ (39~1,000kgf/cm²)
 土被り 7.80m~47.97m
 地下水位 GL-2.0~-26.3m
 (TP+12.7~TP+52.2)

2-3 地質縦断面図

当該工事における地質縦断面図を図-2に示す。



覆工タイプ	下流側 (L=526.050m)						上流側 (L=988.000m)										
	ST 54m	リング支保工 64m	ST 59m	リング支保工 74m	ST 79m	リング支保工 59m	ST 127m	RC 682m		CP 117m	RC 92m	CP 57m	ST 17m				
平面曲線	150R						100R 100R 150R		150R				18R				
地山強度 (N)	130	70~85	50	40~50	30	20以下	20~35	30~40	60~70	70~90	40~50	50~60	80~90	30~80	20~30	10以下	
弾性波速度 (km/s)	3.4 (B級)						2.6 (C級)		3.8 (B級)		2.3 (C級)		3.6 (B級)				
(湧水量)	50	30~50	50~70	70	50~60	100~190	190~240	60	20~30	60	50	25	45	30~35	20	10~15	10

図-2 地質縦断面図

§ 3. 当工事の問題点

当工事では、カッタリングの割れ、欠損が多く発生したが、そのほかに以下のような問題点があった。

- ①発進立坑の18R部急曲線では、T.B.M.施工上の問題点から横坑掘削を人力手堀（ $\phi 4.05 \times 17.0\text{m}$ ）で行った。
- ②発進立坑の地元住民の要請で、シールド工の作業時間が夜勤AM2:00までしか施工できなく、変則作業体制をとった。
- ③再発進（中間）立坑において、上流と下流の管底高さが5.5mから10.0mに変更になり、立坑築造工のため約2ヶ月掘進中止となった。また、中間立坑設備では、マシン引揚げから下流初期掘進まで32日要した。
- ④下流掘進において、多量の湧水（ $15\text{m}^3/\text{h}$ ）、マシンテール部での地山崩落により、リング支保工の組立が困難のため、スチールセグメントに変更した。

表-1 T.B.M.シールド機仕様

シールド本体要目	
後 胴 外 周	$\phi 3080\text{mm}$
全 長	6970mm
シールドジャッキ	$80^{\text{t}} \times 1150^{\text{st}} \times 300\text{kgf}/\text{cm}^2 \times 8\text{本}$
スラストジャッキ	$150^{\text{t}} \times 560^{\text{st}} \times 300\text{kgf}/\text{cm}^2 \times 4\text{本}$
フロントグリッパジャッキ	$80^{\text{t}} \times 120^{\text{st}} \times 300\text{kgf}/\text{cm}^2 \times 2\text{本}$ $80^{\text{t}} \times 90^{\text{st}} \times 300\text{kgf}/\text{cm}^2 \times 2\text{本}$
メイングリッパジャッキ	$500^{\text{t}} \times 170^{\text{st}} \times 300\text{kg}/\text{cm}^2 \times 2\text{本}$
前胴スライド量	MAX. 550mm

カッタディスク要目	
形 式	全断面掘削正逆回転方式
掘 削 径	$\phi 3150\text{mm}$
回 転 数	7/3.5R.P.M.
掘削トルク	37.5T-M
カッタ形式	ディスクローラカッタ
電 動 機	90/45KW \times 4/8P \times 440V \times 3台

§ 4. T.B.M.シールド機

T.B.M.シールド機の形状・機能については次の諸条件を考慮して決定した。

- ①掘削対象岩は一軸圧縮強度 $qu = 3.8\sim 98.1\text{MPa}$ （ $39\sim 1,000\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）の花崗岩である。
- ②急曲線施工である60Rが四ヶ所あり、中折れ角度・余堀掘削の検討が必要である。
- ③湧水対策として、シールドスキンプレート、カッタバスケット及びマシン下部に水抜きを設け、 0.15MPa （ $1.5\text{kgf}/\text{cm}^2$ ）水圧に耐えられるマンホールを準備する必要がある。
- ④ローラカッタの径を、外径が同程度のT.B.M.機に一般的に用いられている $\phi 350\text{mm}$ にする。
- ⑤粉塵対策としてチャンパー内の散水配管、また集塵機の準備もする必要がある。

上記の地質条件、施工条件及びT.B.M.施工実績から定めたT.B.M.シールド機仕様・T.B.M.シールド機・面板カッター配置図をそれぞれ表-1、写真-1及び図-3に示す。

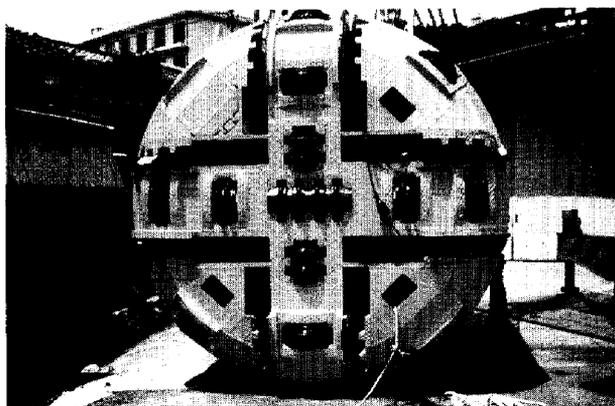
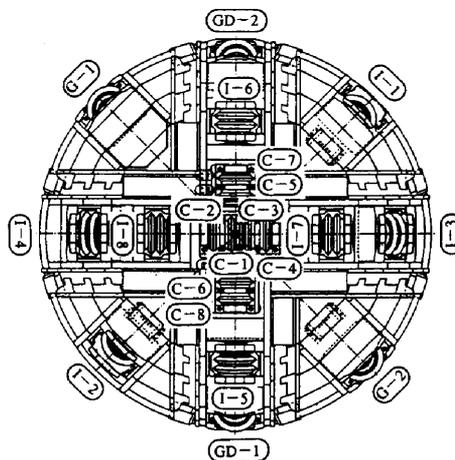


写真-1 T.B.M.シールド機



ゲージカッタ：G-1~2, GD-1~2
 インナーカッタ：I-1~8
 センターカッタ：C-1~8

図-3 面板カッタ配置図

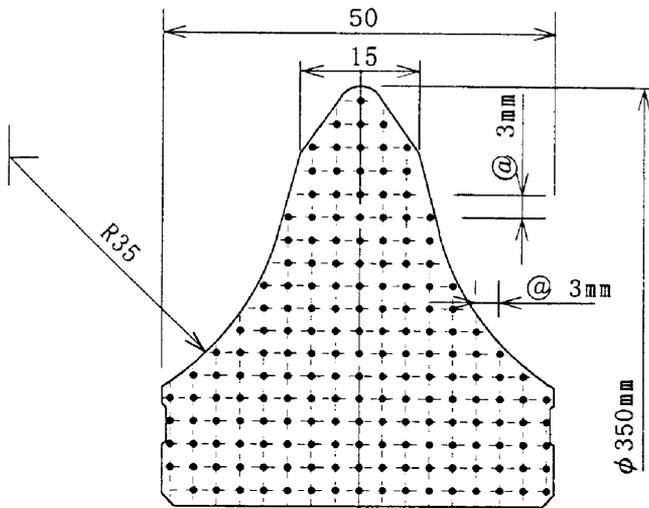


図-4 硬度分布測定位置

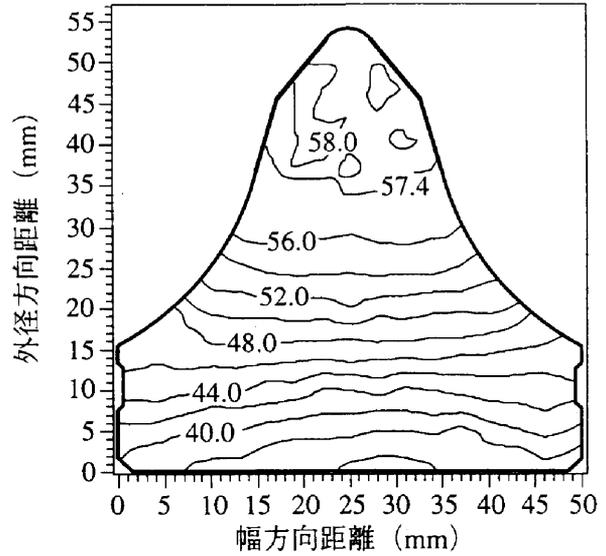


図-5 カッタリング硬度分布

§ 5. カッタライフ調査検討および対応策

当工事における地山の一軸圧縮強度は、中硬岩・硬岩の測定値 ($qu=39.2\sim98.1\text{MPa}$ ($400\sim1,000\text{kgf/cm}^2$), ただし発達立坑部の風化岩帯は除く) であったにも関わらず、ベアリング破損によるボディ交換、リングの割れ、及び偏摩耗の為のカッタ交換が多発した。その原因を明らかにするために、カッタリング及びカッタボディの調査を行い、カッタプロフィールの変更、ズリの取込量も考慮したスクレーパー改良について検討した。

5-1 カッタリングトライアル

当初リング (TYPE-1) の摩耗状態は、花びら状の剝離・欠損・割れであった。その原因として、リング焼ばめ時におけるリング内の残留引張応力が、リング先端の小さな欠損に作用したため、回転に伴ってリングが大きな欠損に至ったと考えられた。そこで、リング熱処理方法を変更し、焼入れや焼戻しに高周波焼入れを調査するとともに、材質・硬度分布などの測定を行った。TYPE-1の硬度測定位置およびその分布結果を図-4、図-5に示す。また、カッタ交換時摩耗量測定記録から摩耗傾向・分析してみた結果より、カッタの仕様を当初の韌性重視から硬度重視へ移行し、図-6に示すようなカッタリングトライアルを行った。毎日の面板点検から、ゲージカッタ付近 (特にG-1~I-3) においては両サイドの摩耗が激しく、刃先が尖る傾向にあったことが明らかになり、その対策として切込量を犠牲にして先端角度の緩やかな形状を取ることとした。カッタ交換時摩耗量測定記録を図-7に、およびカッタリング破損状況写真を写真-2、写真-3に示す。

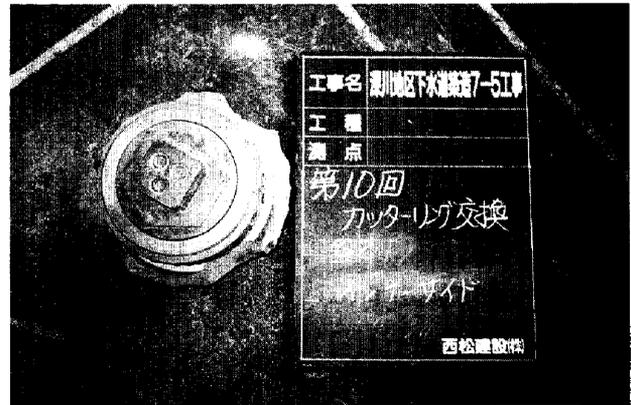


写真-2 第10回カッタ交換時G-2破損状況

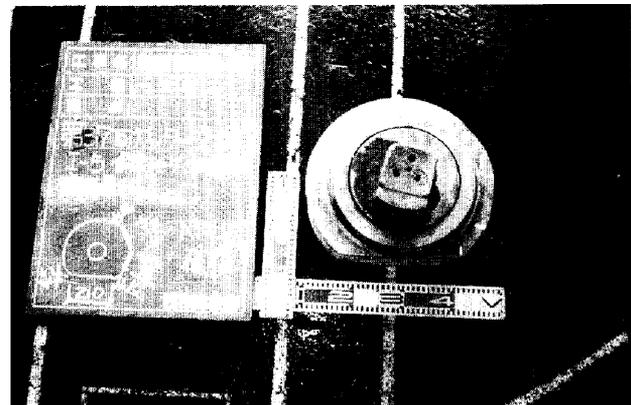


写真-3 第37回カッタ交換時I-5破損状況

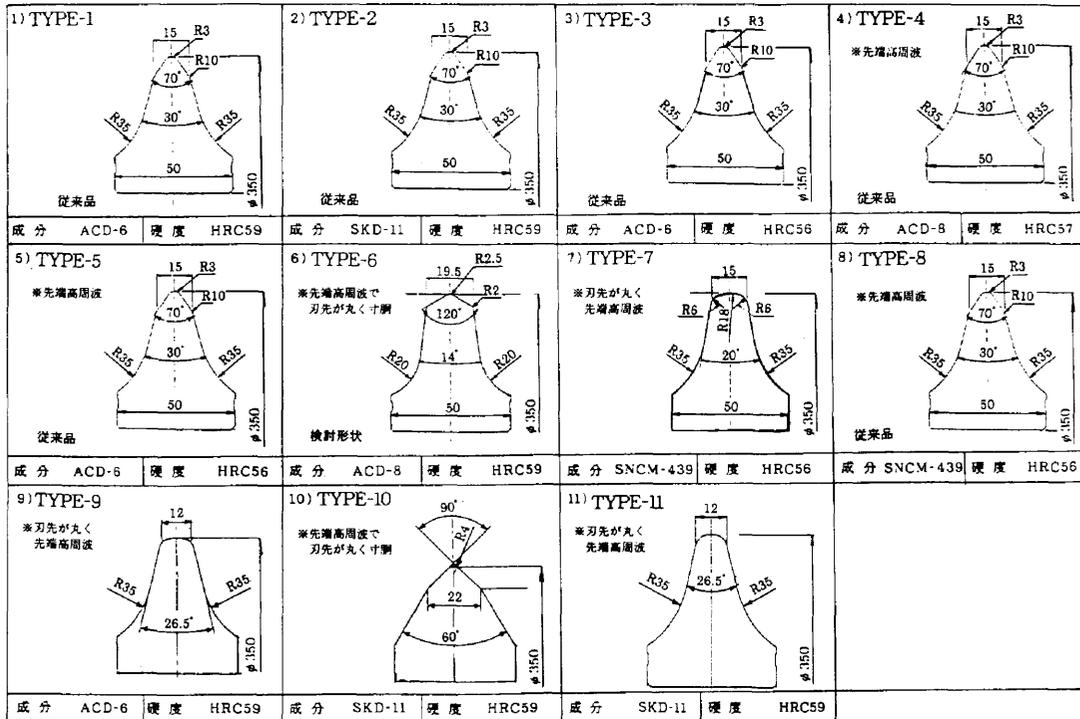


図-6 カッタリングトライアル一覧表

5-2 広島型花崗岩の化学成分分析

花崗岩類は六甲花崗岩等の硬度が大きい岩を有しており、当掘削地山も設計値より想定以上に硬い可能性が出てきた。そのため、切羽において地山の圧縮強度試験を実施し、それに加えて掘削地山の化学分析を実施した。

その化学分析結果から、ダイヤモンドと同等の硬度であるといえる金鋼砂、鋼玉 Al_2O_3 (Corundum硬度9) が2.5%も含まれ、またX線解析による分析結果からは石英 SiO_2 (Quartz硬度7)、が55%以上含有していることが判明した。

5-3 使用ベアリングの仕様調査

当初すべてテーパローラを使用していたが、カッタボディの破損により偏摩耗が発生したため、外周のゲージ系にスラスト力の強い平行ローラを使用しインナー系に従来のテーパローラを使用した。

平行ローラベアリングとテーパローラベアリングの仕様調査結果を表-2に示す。

5-4 切羽での掘削ズリ残量測定

切羽に取り残しているズリ残量を測定するため、マシン前胴を0.47m後退させ、掘削ズリの残量を測定した。

その測定結果を図-8に示す。これより、掘削ズリ残量は、 $0.046m^3$ と算出できる。仮に、掘進中の切羽と面板との距離を0.10mとすれば、掘削ズリの深さは計算結果より約0.35mとなり、外周部にあるG-1-I-3までのカッ

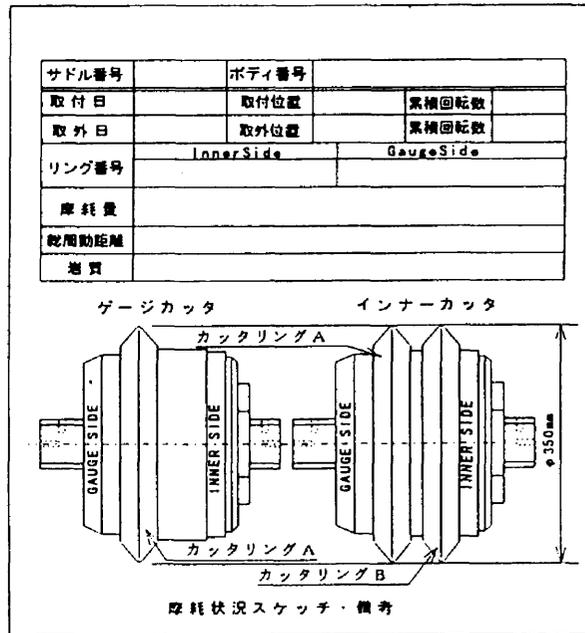


図-7 カッタ交換時摩耗量測定記録表

表-2 ベアリング仕様調査結果

	テーパローラ	平行ローラ
基本動定格荷重	ラジアル 35[t]	ラジアル 30[t]
	スラスト 24[t]	スラスト 40[t]
基本静定荷重	ラジアル 53.3[t]	ラジアル 45[t]
	スラスト 35.6[t]	スラスト 60[t]

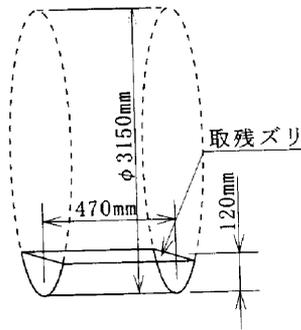


図-8 掘削ズリ残量測定結果



タリングが取り残したズリの中を回転することになる。そのため、二次破碎が発生しカッタートラブルの原因となったと考えられる。

5-5 具体的対策

偏摩耗、カッターリングの割れ、ボディのベアリング破損が発生した時点において、掘削データを比較検討し、以下の改善を行いつつ、掘削を継続させていった。

①油圧回路

油圧が定圧管理のためにジャッキスピードにばらつきがあったので、油圧回路にフローコントロールを取付け油圧管理を定量管理とし、掘削速度の平均化をはかった。

②総推力

カッターリングへの負荷を少しでも抑える為に、最大推力の90%である270tまでとして、掘削管理をした。

③マシン改造

中間立坑において、T.B.M.シールド機を地上に引き上げ面板の改造を行った。写真-4に示すように面板開口率を16%から21%へと改造し、更に掘削ズリ取込効率の向上の為、サイドスクレーパーにすくい角を付け、サイド取込口拡大の改造も施した。その結果ズリの取り残しは、前述の0.046m³から0.006m³へと大幅に減少した。

④スクレーパー

掘削ズリ取り残しにより面板開口部が閉塞状態になり、圧密が発生しカッター回転不良となることが考えられたため、フェイススクレーパーをフラット型からL字型(片回転用)に変更し、なおかつ、中間立坑での面板改造時にT字型(両回転用)に変更した。

⑤カッターリング及びボディ

カッターリングは11種類に及ぶ試行の結果、成分をSKD-11、先端高周波焼き入れの硬度HRC-59、および先端角度が緩やかな形状を採用した。また、ボディについては、スラスト力を受けやすいゲージカッターに平行ローラベアリングを使用し、インナーカッターについては従来のテーパローラベアリングを採用した。

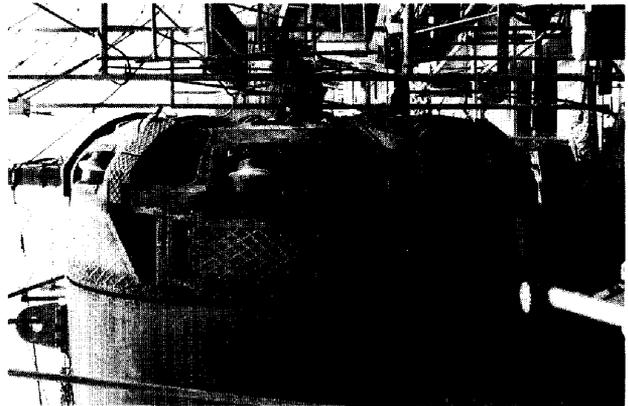


写真-4 面板改造完了(開口率21%)

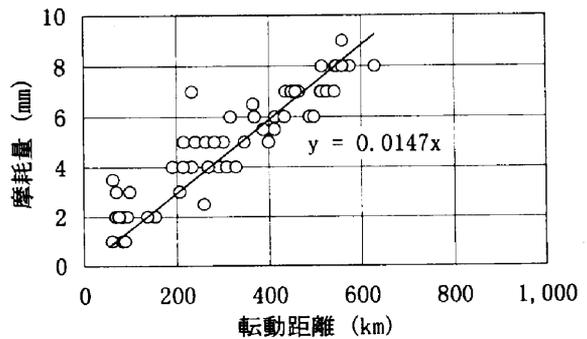


図-9 TYPE-1の摩耗量と転動距離

表-3 上流と下流における摩耗係数比較表

	摩耗係数 (×10 ⁻² mm/km)				
	TYPE-1	TYPE-2	TYPE-6	TYPE-9	TYPE-10
上流側	1.36	1.69	2.24	1.59	1.27
下流側	1.47	1.08	1.03	1.22	0.95

下流側におけるTYPE-1の摩耗量-転動距離の関係を図-9に、その関係から導き出された摩耗係数をまとめたものを表-3に示す。これより、上流側と下流側を比較した場合、改良後の定数が小さくなり転動距離が伸びたといえる。

カタッタ番号	当初 (掘削半径)	最終変更後 (掘削半径)	カタッタ番号	当初 (掘削半径)	最終変更後 (掘削半径)
G-1, G-2	(1580)	(1580) センターに移動	I-2	(1451) 2リングタイプ	(1451) 変更なし
GD-1	(1567)	(1560) センターに移動	I-3	(1344)	(1344)
			I-4	(1220)	(1220)
GD-2	(1552)	(1540) センターに移動	I-5	(1085)	(1085)
			I-6	(945)	(945)
I-1	(1534)	(1494) 1リングタイプに変更	I-7	(805)	(805)
			I-8	(665)	(665)

注) I-3～I-8はI-2と同様に2リングタイプで変更なし

図-10 カッタプロフィール変更経緯

§ 6 カッタライフ結果と考察

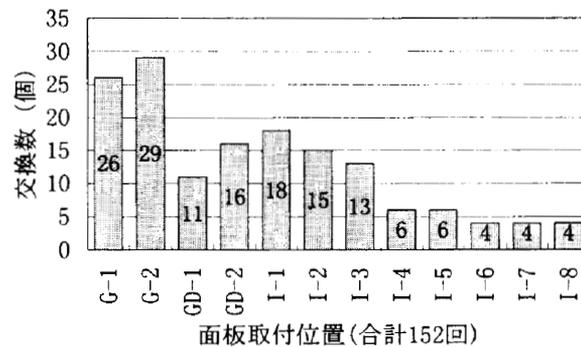
カッタリングの破損が続発したため、ベアリングに対する負荷を軽減する目的で、G-1・G-2はカタッタボディのセンターに移動し、I-1は2リングタイプを1リングタイプに変更した。カッタプロフィール変更経緯を図-10に示す。これより、外周部のG-1・G-2の交換回数が多いことがわかる。

カタッタボディおよびカッタリングの交換数および実績を図-11から図-13に示す。これらから、以下のことが明らかになった。

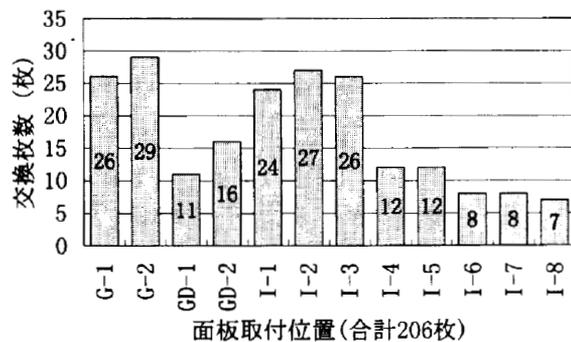
①カタッタボディ

カタッタボディ交換の総合計数は152回に及んだが、その内転用は74回であった。ボディは基本的にリングと異なり転用可能であるが、当該工事ではベアリングが破損し転用不可能になることが多く、カタッタボディ使用数が増加する結果となった。これらカタッタボディにおける諸問題解決のため、内部構造や組込リング数の異なる五種類を納入し、試験導入した。図-13より、スラスト力の大きい平行ベアリングがテーパベアリングよりも転動距離において優れていることが分かった。ただし、テーパベアリング2リングボディはスラスト力・推進力の負荷の少ないインナー側のみ使用の為、比較対象には適しておらず、ここでの考察には省いた。

実績としては、カタッタボディ1個当たりの掘削量及び転動距離は、148m³/個、541km/個であった。



a) カッタボディ交換数

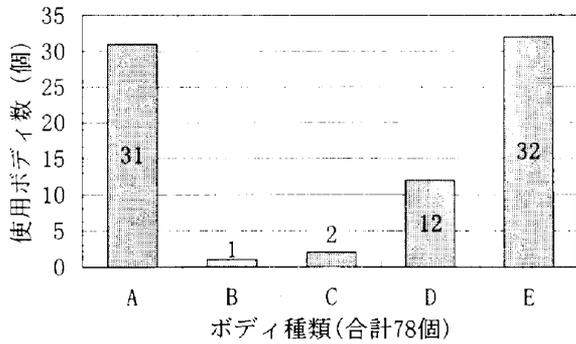


a) カッタリング交換枚数

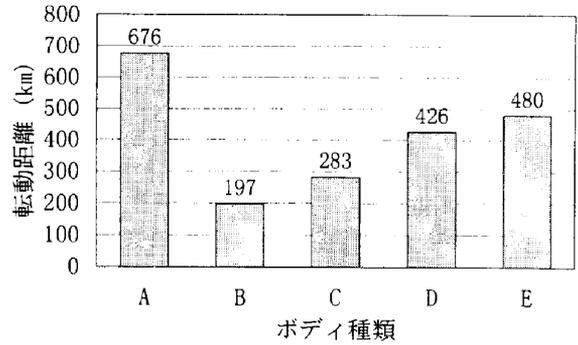
図-11 面板取付位置による交換数と交換枚数

②カッタリング

カッタリング交換の総数は206枚に達した。ただし、その内の10枚は状態が良く転用可能であったため、再使用した。交換枚数はTYPE1・2が抜き出ているが、これは納



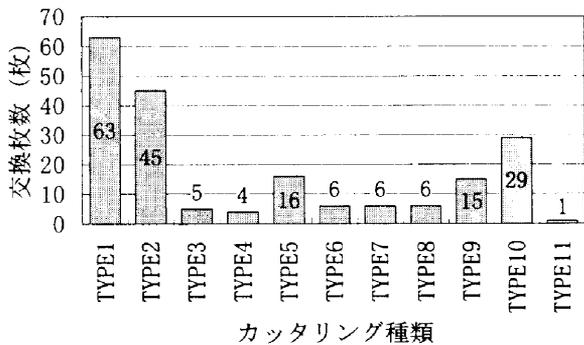
a) 使用ボディ数



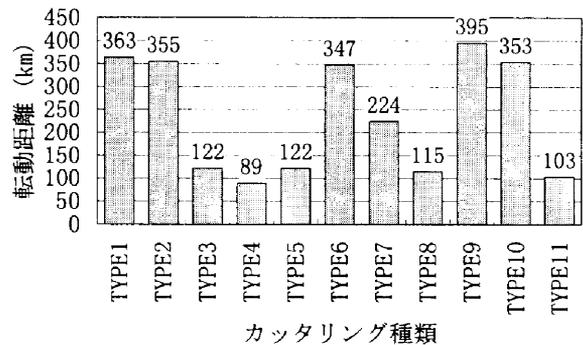
b) 転動距離

A: テーパーベアリング使用品 2リング専用ボディ
 B: テーパーベアリング使用品 1リング専用ボディ
 C: 改良テーパーベアリング使用耐久スラスト力向上 1リング専用ボディ
 D: 平行ベアリング使用品 2リング専用ボディ
 E: 平行ベアリング使用品 1リング専用ボディ

図-12 ボディ種類による使用数と転動距離



a) 交換枚数



b) 転動距離

図-13 カッタリング種類による交換枚数と転動距離

入枚数が多い為であり、TYPE10等はカッタ破損に対し材質を検討し、製造後、使用している。転動距離は、TYPE1・2およびTYPE9・10がほぼ同じであるが、リングへの負担が大きいG-1及びG-2等にTYPE10を使用したためであり、結果的にはSKD-11の材質で刃先高周波焼き入れのTYPE10が優れていることが判明した。

実績としては、カッタリング1個当たりの掘削量及び転動距離は、59m³/個、317km/個であった。

§ 7 おわりに

一般的に、カッタ摩耗量を推測するには、高硬度の岩盤との関係のみに着目する。しかし、ダイヤモンドと同等の硬度といえる金鋼砂、鋼玉Al₂O₃ (Corundum硬度9)の存在、また、石英SiO₂ (Quartz硬度7)などの硬

度の高い鉱物が掘削岩盤に多量に含まれている場合、カッタの摩耗に大きな影響を及ぼすことが明らかになった。今回、カッタライフ問題が数多く発生した要因として、地山石英含有量が、通常は多くても40%程度であるにも関わらず、当該工事の広島型花崗岩の石英含有量は55%以上、場所により70%を越えることや、マシン掘進において高硬度のズリの取り残しによる二次破碎が挙げられることが前述の解析より推測できた。このように、広島型花崗岩という地域色の強い岩盤掘削の中で、試行錯誤のうちに到達を迎えたが、今後もこれらの経験を活用し、ディスクローラカッタの配置、取付角度、カッタプロフィール等のマシン設計、推進圧、およびトルク値の分析が必要と考えられる。

最後に、本施工に当たり様々な御指導・御協力を頂いた関係各位に深く感謝し、御礼申し上げます。