

ビット耐久性能と シールド面板設計に関する一考察

Study on Relation between Shield Cutterbit Durability and Cutterface Design

権守英樹¹・竹内友章¹・米沢 実²・金森研二³
Hideki Gonnokami and Tomoaki Takeuchi and
Minoru Yonezawa and Kenji Kanamori

¹正会員 東京電力株式会社建設部土木建築技術センター (〒100-8560 東京都千代田区内幸町1-1-3)

E-mail:gonnokami.h@tepcoco.jp

²正会員 鹿島建設株式会社東京土木支店土木部 (〒107-8477 東京都港区元赤坂1-3-8)

³正会員 大成建設株式会社横浜支店土木部 (〒231-8616 横浜市中区長者町6-96-2)

This shield machine was designed to construct a tunnel (excavation distance 18km) which crossed Tokyo Bay without building an intermediate shaft on the sea so that excavation of 9km was enabled with one shield machine. Especially, in order to improve the abrasion resistance concerning the cutter bit, the new material was adopted for the edge of the bit, and this shield machine was equipped with the large-sized preceding bit, applied the measure such as improvement of soil and sand taking in efficiency. This report describes the effectiveness of the long-distance digging measure from analysis of the cutter face plate which is dismantled after the digging ends.

*Key Words : long-distance digging measure, large-sized preceding bit,
Improvement of soil and sand taking in efficiency*

1. はじめに

都市空間の過密化に伴う用地制限、立坑基数の削減によるコストダウンといった観点から、今後、シールドトンネルの長距離化へのニーズがより高まると予想される。長距離掘進を行う上で、設備劣化・損耗等に起因するトラブルの発生は大幅な工程遅延につながる可能性が高いことから、シールド工法には、地質や環境条件の変化に対応し、安定した掘進を行うことができる、より信頼性の高い性能が要求される。

長距離を掘進するための重要な設備性能の一つにカッタビットの耐久性があるが、その設計につ

いては、面板、チャンバ部を含めた設計体系として明確になっていないのが現状である。

東西連絡ガス導管新設工事では、海上に中間立坑を設けずに東京湾を横断するために、一台のシールドマシンによる掘進延長としては世界最長級となる9.0kmを掘進することが求められた。そのためシールドの設計にあたっては、既往の施工実績から得られた知見を反映し、面板全体を含めたカッタビットの耐久性検討を行った。本文ではこの成果として、東京湾海底を横断した2台のシールドのカッタビット損耗実績の調査結果と実績の分析を通じて得られた知見を報告する。

2. カッタビットの耐久性向上のための主な対策

本工事のシールドは外径 3.6m と小型であり、大がかりなカッタビット交換機構などを装備することが困難であった。そのため、シールド面板の設計では、ビット交換を行わずに 9km を掘進することを目標とし、ビット形状や配置の工夫、土砂の取り込み効率向上等の対策を施すことにより、ビットの延命化をはかることとした。主な対策を以下に述べる。

(1) チップ材の仕様

本工事のカッタビットに装着する超硬チップには、近年、長距離施工での適用実績が増えつつある E3 種 (Sinter-HIP 相当品) を採用した。E3 種 Sinter-HIP は、従来使用されてきた E5 種に比べて耐摩耗性に優れ、同等の抗折性能を有する材質である。

超硬チップの寸法は長距離対応として、摩耗が進行する方向にできるだけ高さを有している方が望ましい。メインビットに装備するチップは、ロウ付けが可能な実績最大値 (チップ材の加熱ひずみ防止) として、チップ長 60mm、厚さ 25mm とした (図-1)。

(2) 大型先行ビットの採用

本工事では、比較的硬質な洪積層を長距離にわたって掘削すること、砂礫層の出現が予想されたこと (図-2: 音波探査結果において強い内部反射が見られる部分) から、メインビットの保護を目的とし、その同パス上に従来に比べて大型の先行ビットを装備した。先行ビットは、富津工区ではメインビットの外周側、扇島工区ではメインビットの全軌跡を保護するように配置し、両ビットの高低差は、富津工区で 50mm、扇島工区で 70mm とした。

先行ビットの形状は、富津工区では、硬質地盤および砂礫層に対して切り込みやすく、耐久性も高い多段シェル型とし、扇島工区では、立坑発進時の仮壁切削 (石灰石コンクリート) および礫層に対する耐衝撃性を考慮し、幅広の切削型とした (図-3)。

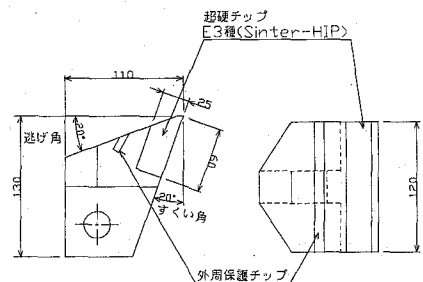
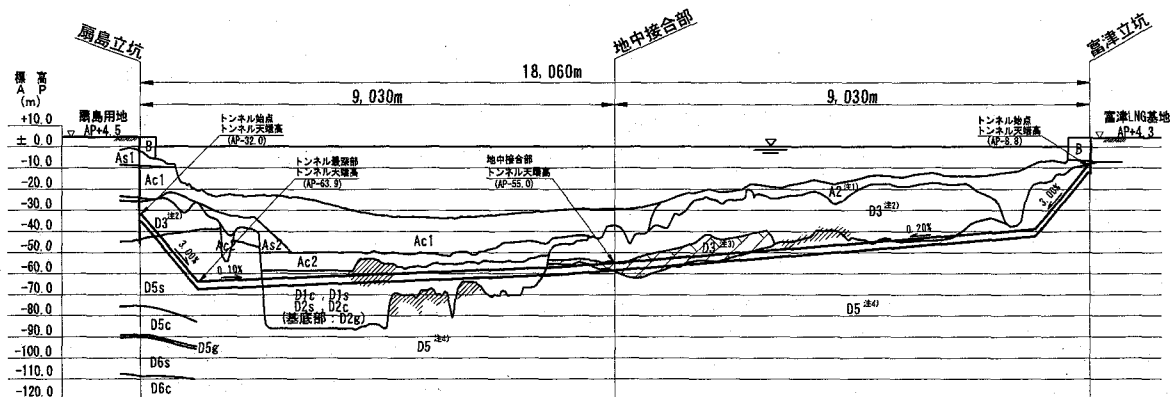


図-1 メインビット形状 (富津工区)



地質時代	地層名	記号	土質名称	地質時代	地層名	記号	土質名称		
完新世	埋立層	B	埋土・盛土	更新世	七号地層	D1s	砂質土		
	有楽町層	As1	砂質土			D1c	粘性土		
		Ac1	粘性土			D2c	粘性土		
		As2	砂質土			D2s	砂質土		
		Ac2	粘性土			D2g	礫質土		
更新世	東京層上部	D3	D3s、D3cの互層			D3c	粘性土		
						D3s	砂質土		
						D5s	砂質土		
			江戸川層		D5c	粘性土			
					D5g	礫質土			
	上総層群	D6			D6s、D6cの互層			D6s	砂質土
								D6c	粘性土

注1) A2：As2、Ac2の互層

注2) D3：D3s、D3cの互層

注3) D3：D3c（部分的に固結）が卓越。

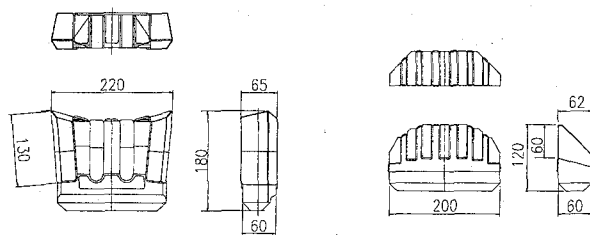
注4) D5：D5sが主体でD5cを部分的に介在

：音波探査結果において強い内部反射を示す。

：音波探査結果において内掛け部分を示す。

注1) A2: As2, Ac2の互層
 注2) D3: D3s, D3cの互層
 注3) D3: D3c (部分的に固結) が卓越
 注4) D5: D5s が主体で D5c を部分的に介在
 : 音波探査結果において強い内部反射を示す。
 : 音波探査結果において白抜け部分を示す。

図-2 想定地質縦断面図



(扇島工区)

(富津工区)

図-3 先行ビット形状

(3) 土砂取り込み効率の向上

ビットの摩耗量は土砂の取り込み効率と密接な関係があり、カッタディスク上での土砂の滞留等がビットの切削抵抗を増大させると考えられている。長距離掘進を実現するためのシールド設計の主要課題は、ビット単体の性能向上に加え、土砂の取り込み効率を向上させることである。

a) 最外周からの土砂取り込み効率の向上

本工事のシールドは、両工区ともカッタディスクの支持をセンターシャフト方式としているが、チャンパー内の空間を広げ、土砂の取込効率の向上に配慮したことが、その採用理由の一つである。

最外周ビットで切削された土砂を効率よくチャンパー内に取り込むため、カッタディスクの外周リングを全周にわたり省略した。また扇島工区では、最外周の先行ビットで切削した土がチャンパー内に流れやすくなるように、ビットの形状をスリット方向へ傾斜をつけた構造に加工した。

b) スリット部からの土砂取り込み効率の向上

粘性土によるスリット部の閉塞を防止するには、スリットの幅はできるだけ広くすることが望ましい。一般に、切羽の安定を保ち、粘性土の取り込み効率を向上させる効果が期待できるスリット幅は200～280mmと考えられていることから、スリット幅200mm以上を確保することを基本に、ビットの配置および面板全体の耐荷力を検討して、スリット幅を決定した。また、富津工区では、ルートの後半に出現が予想された硬質粘性土層への対応として、土圧式シールドにおいて適用実績が多いパイプフレーム式スポークを採用した(写真-1)。

この結果、カッタ開口率は、富津工区では42%、扇島工区では43%と、既往の泥水式シールドの開口実績と比較して最大に近い値となった。

中間リングについても、スリットへの土砂の取り込み効率を向上させるため、面板全体の耐荷力を検討したうえで、可能なかぎり簡素化すると

もにチャンパ方向へ傾斜をつけた形状に加工した。

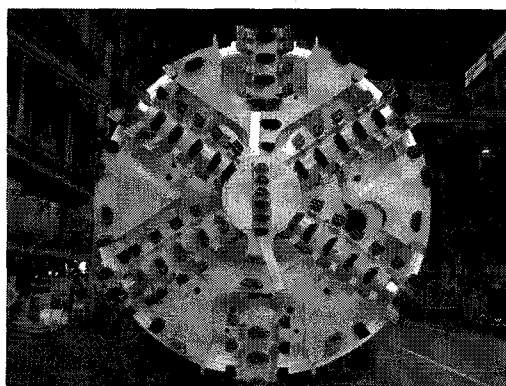


写真-1 パイプフレーム式スポーク (富津工区)

(4) 面板外周部側面およびスリット部の摩耗対策

面板の外周部側面およびスリット部周辺は、土砂の取り込みによる摩耗が進行する可能性が高い。そこで、外周部側面およびスリット部周辺には、摩耗対策として硬化肉盛を施した。また外周部側面には、切削時の地山との干渉による摩耗対策として超硬チップを埋込んだ(写真-2)。

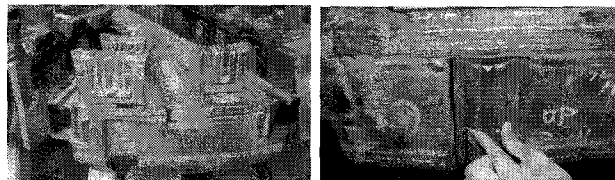


写真-2 面板外周部側面の摩耗対策 (扇島工区)

3. シールド面板の損耗調査結果

設計で配慮したビット延命対策の効果を確認する目的で、地中接合後に解体したシールド面板を復元し、その損耗状況を調査した。

(1) メインビット

メインビットの摩耗量およびその結果から算定される摩耗係数を図-4 (a), (b) に示す。

両工区とも既往実績に比べて、格段に小さい摩耗係数となった。さらに、メインビットに装備した超硬チップのうち、先行ビットの軌跡で保護される部位には摩耗が発生しなかった²⁾。特に、扇島工区では、メインビットの軌跡の全てをカバーするように先行ビットを配置したため、メインビットに装備した超硬チップは初期の状態のまま保存される結果となった(写真-3)。設計では、先行ビットで切り込みを入れてメインビットがスリ

ットに掻きこむという掘削メカニズムを考えたが、実際は先行ビットが掘削の主体をなし、メインビットは背後で温存されたバックアップビットの位置づけにあった。

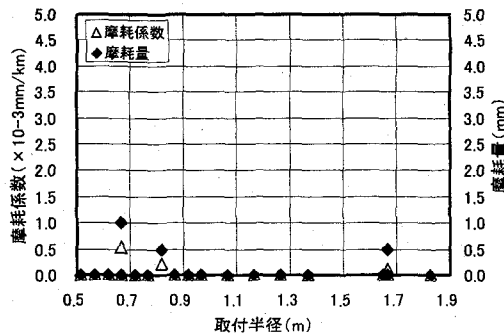


図-4 (a) メインビットの摩耗量と摩耗係数 (扇島工区)

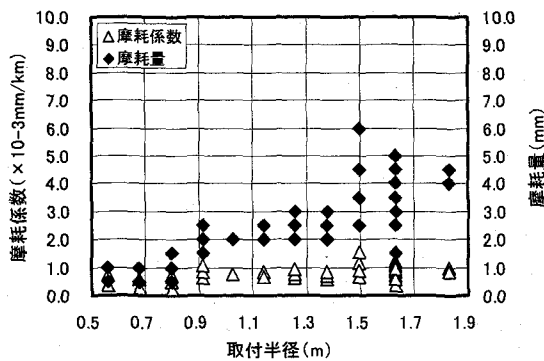
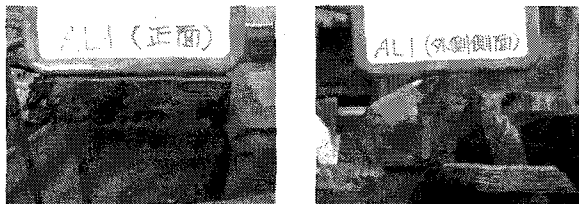


図-4 (b) メインビットの摩耗量と摩耗係数 (富津工区)



(正面) (側面)
写真-3 メインビットの状況 (扇島工区)

(2) 先行ビット

先行ビットの摩耗量と摩耗係数の半径方向分布を図-5 (a), (b) に示す。

先行ビットの実績摩耗量も想定摩耗量を大きく下回る結果となった²⁾。実績が想定を下回った要因としては、地質の差異、設計段階の摩耗係数の安全側評価等に加え、幅広のビット形状としたこと、土砂の取り込み効率がよく切削時のビットの負荷が軽減されたことが考えられる。

この中で、最外周ビットの摩耗係数は、他のビットに比べ、両工区ともに大きくなった。最外周部の先行ビットの摩耗状況を写真-4 に示すが、面板外周側の角がとれて大きく摩耗しており、外周側面での地山との接触および外周からのスリット

部への土砂の流れ込みによる影響と考えられる。

半径方向の摩耗係数の分布については両工区で差異が見られた。富津工区では、先行ビットの摩耗係数は半径方向に概ね一様であるのに対し、扇島工区では特に半径 1m 以内の範囲で中心部に向かって摩耗係数が増加する傾向が観察された。

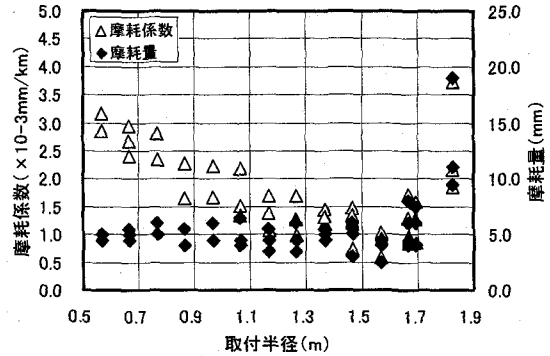


図-5 (a) 先行ビットの摩耗量と摩耗係数 (扇島工区)

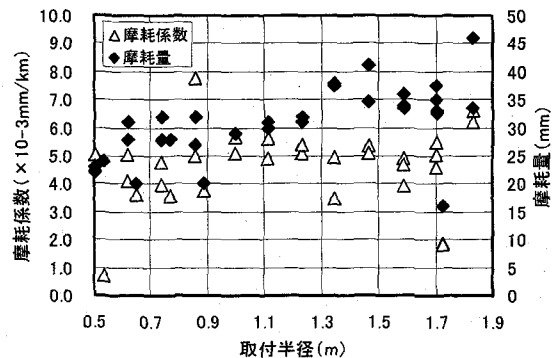


図-5 (b) 先行ビットの摩耗量と摩耗係数 (富津工区)



写真-4 最外周先行ビット損耗状況 (扇島工区)

(3) センター部ビット

両工区ともビットの割れ、欠けはセンター部に集中しており、その損傷程度もスリット周辺部に比べて大きいものが見られた。代表例として、扇島工区のビットの割れ、欠けの分布を図-6 に示す。センター部付近のビットに損傷が集中した理由と

しては、ビットの密度が高いため掘削された礫がスリットに流れるまでに滞留し、ビットと接触(衝突)する頻度が高かったことが考えられる。

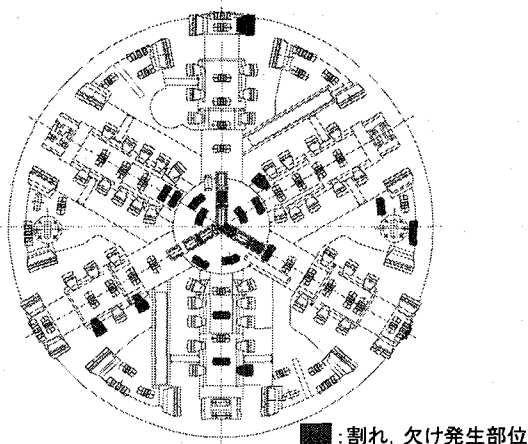


図-6 ビット割れ, 欠け分布図 (扇島工区)

(4) 面板およびフード先端部

両工区とも面板には変形もなく、スリット周辺に施した硬化肉盛りの摩耗量もわずかであった。

面板の最外周部となるカッタホルダ部で2mm程度の硬化肉盛りの摩耗が見られたが、母材の保護としては十分であった。

フード部先端全周にわたり、土砂の取り込みによると考えられる摩耗が発生した。先端部に硬化肉盛りを施さなかった2工区では、フード先端部のエッジが削れて全体がR状になっており、12～13.5mmの摩耗が発生した(写真-5)。

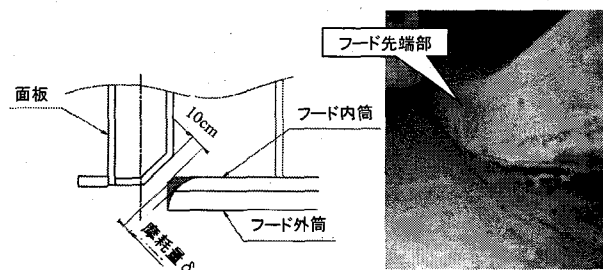


写真-5 フード部先端の摩耗状況 (扇島工区)

4. 土砂の取り込み効率向上対策の評価

ビットの実績摩耗量が想定摩耗量に比べて少なかった要因の一つとして、土砂の取り込み効率が高かったことを上げた。ここでは、掘進データから、その取り込み効率を確認した。

両工区の掘進実績として掘進速度、トルクの変

動を図-7 (a), (b)に示す。図中には、処理土のトラックスケールから判定したルート上の地質区分を併記した。

両工区とも、全線にわたり装備トルク(扇島工区 1014kN・m, 富津工区 805kN・m)に対して余裕を確保して掘進を行うことができ、スリットの閉塞が原因と考えられるトルクの異常上昇は発生しなかった。

また、地中接合部付近では、両工区とも切羽の全断面に硬質粘性土が出現していると考えられる地層を掘進したが、砂質土卓越層掘進時と同等の速度(平均 75～85mm/min)を維持することができた。この掘進速度は既往工事における硬質な粘性土層の掘進実績と比較して高速であることから、両工区のシールドとも土砂の取り込み効率に優れていたと評価することができる。

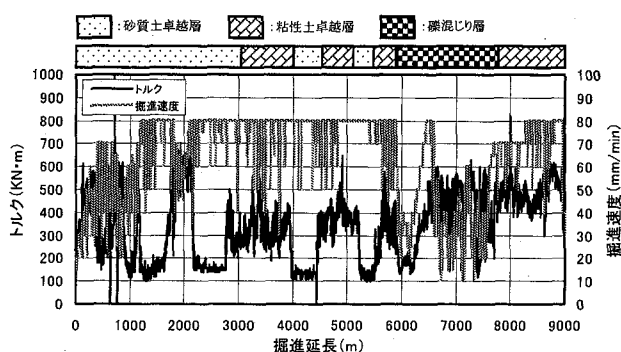


図-7 (a) 掘進データ (扇島工区)

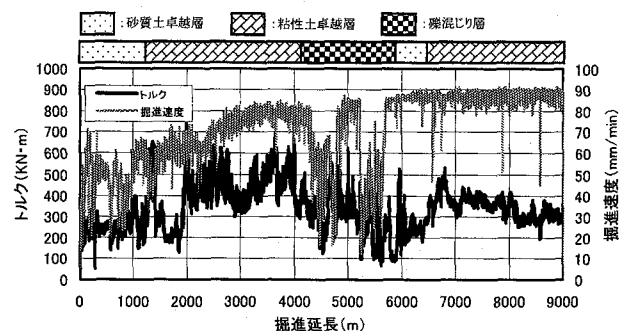


図-7 (b) 掘進データ (富津工区)

5. 超硬チップ損耗面の詳細調査

超硬チップに生じる損傷メカニズムを把握するため、超硬チップの損耗面に対し、走査型電子顕微鏡(以下、SEM)による観察、エネルギー分散X線分光分析装置(以下、EDX)による元素分析を行った。なお、調査は、扇島工区のカッタビットを対象に実施した。

(1) チップ割れ面

超硬チップの割れの発生と進行のメカニズムを把握するため、チップに割れが生じたビットの調査を行った。

目視観察の結果、割れの先端にはチップの欠損が見られ、この部分が起点となって亀裂が進行したと考えられた。また、破面には亀裂の進展方向に対して直交する層状の模様が観察された(写真-6)。

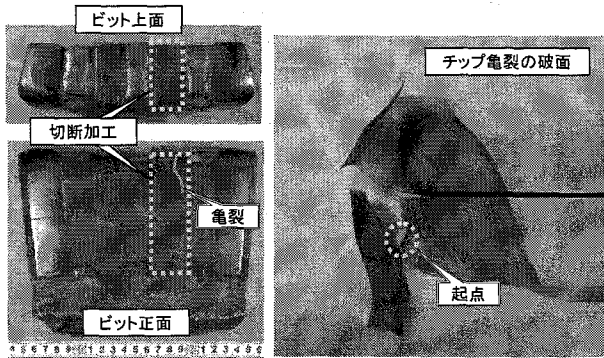


写真-6 超硬チップ割れの状況
(扇島工区, 最外周先行ビット)

破面に対してEDX分析を行った結果を図-8に示す。

超硬チップは、タングステンカーバイド(以下、WC)とコバルト(以下、Co)の粉末を焼結させて製造する。ダイヤモンドに次ぐ硬度を持つWCが合金の骨格をなし、Coは骨格をつなぐバインダの役割をする。

EDXによる分析の結果、破壊起点の近傍ではチップを構成する成分(WC, Co)に加えて、土壌成分(Al, Si, Ca)およびCo摩耗粉の付着が見られた。また、亀裂進展途中と考えられる箇所では、破壊起点の近傍に比べて量は少ないが、土壌成分(Ca), Co摩耗粉が見られた。

これらの観察結果から、チップの割れは、礫を切削した際の衝撃により、表面に欠損が生じ、同様の衝撃力が繰返し作用することにより内面に進行したと考えられた。

面板の損耗調査において、センタービット部付近に集中したチップの割れ、欠けは礫の滞留によるものと想定したが、割れ面の詳細観察の結果からも、当該箇所は礫との遭遇頻度が高い環境にあったと考えられた。

なお、今回観察した亀裂は分岐による微細な破片を誘発していなかったことから、採用した超硬

チップは高靱性の材料であると考えられた。

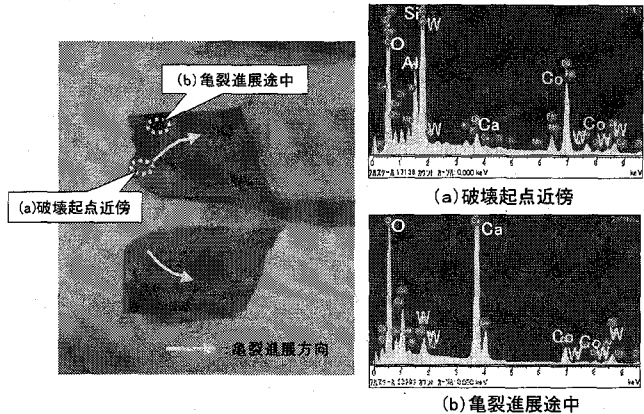


図-8 超硬チップ割れ面の元素分析の結果

(2) チップ摩耗面

カッタディスクの取付け半径 1.2mの位置に装備した先行ビットから供試体を切り出し、SEMによる観察を行った。チップ表面の拡大写真を写真-7に示す。

チップ表面の一部に、一様な方向に線状に走る傷が観察された。超硬チップの硬度を考えると、この傷は、礫を切削した際の衝撃により発生したものと考えられる。傷の位置と傷のない位置をSEMにより観察した結果を写真-8に示す。

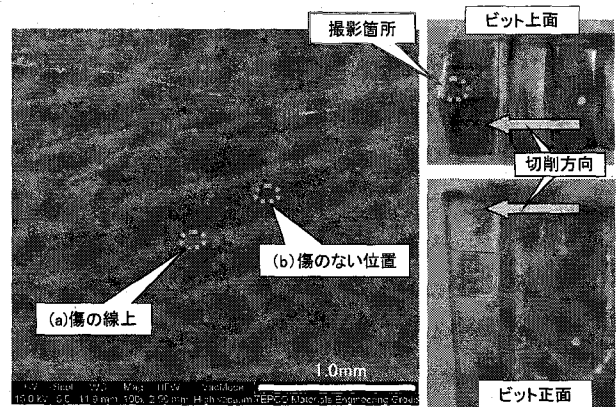


写真-7 チップ表面のSEM観察結果

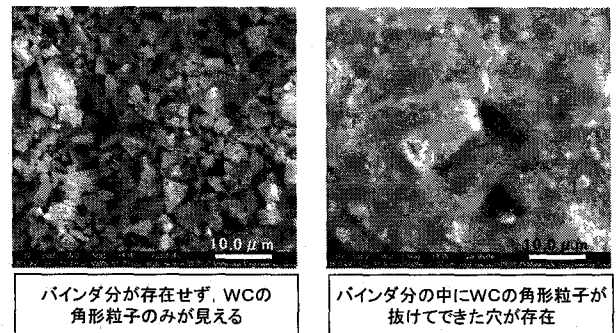


写真-8 チップ表面の損傷に着目したSEM観察結果

傷の線上(a)では、バインダ分が見られず、WC粒子とバインダ分の境界に沿ってチップが削りとられた状態と考えられた。一般に超硬チップの摩耗は傷のない位置(b)に見られるように、WC粒子がバインダから脱落することにより進行する。傷の線上に見られるようなチップが削りとられた状態では、WC粒子がより脱落しやすくなるため、チップの摩耗は通常の摩耗形態に比べて進行しやすくなると考えられる。

観察したビットでは、切削傷はその表面の一部にのみ見られたが、センター部付近で礫が滞留していたことを考えると、センター部付近に配置したビットには、より多くの切削傷が観察されると想定される。

扇島工区において先行ビットの摩耗係数が中心部で大きくなったが、センター部は外周部に比べて礫分が滞留する環境にあり、衝撃によりチップが削られる損耗モードが発生する頻度が高かったことが、その主要因と考えられる。

6. おわりに

9000mの長距離を掘進するために設計したシールドの面板損耗状況を調査し、設計の有効性を確認するとともに、長距離対応の設計を行う上での留意点を整理した。得られた知見を以下にまとめる。

- ・ 大型の先行ビットを配置した結果、先行ビットが掘削の主体を担い、メインビットがバックアップビットの位置づけとなった。長距離掘進への対応として、先行ビットに主体的な切削機能を期待する設計が可能である。
- ・ E3種(Sinter-HIP)の超硬チップをロウ付け可能な最大寸法でビットに取付けた結果、所要の耐摩耗性を確保することができた。また、取り込み効率に優れたスリット部周辺では、礫に対する耐衝撃性も確保されたと考えられる。
- ・ 既往最大相当の面板開口率の確保、外周リングの省略等により土砂の取り込み効率を向上させた結果、切削抵抗が軽減され、ビットの異常摩耗等を発生させずに掘進を完了することができた。
- ・ 最外周ビット側面、面板最外周側面で、地山との接触、チャンバ内への土砂の流れ込みに

よると考えられる摩耗が発生したが、硬化肉盛り等の対策が有効で、想定を超える異常摩耗は発生しなかった。なお、長距離対応として、フード部先端についても適切な摩耗対策を講じる必要がある。

ビットの損耗面を走査型顕微鏡等で詳細観察した結果より、礫をスムーズにチャンバ内に取り込むことができれば、ビットが損耗する程度・頻度を減少させることができると考えられた。今回と同等径のシールドについて長距離対応の設計を行う際は、センター部付近において、ビットの大型化による耐久性の向上と土砂の取り込み効率の向上を両立させる対策を立案することが課題である。

謝辞：本報告中の超硬チップ損耗面の詳細調査には、東京電力(株)技術開発研究所材料技術センターの多大なるご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 富所達哉, 高橋聡, 野口和博: 東京湾海底地質の想定と実際, トンネルと地下, vol.37, No.7, pp.7-17, 2006.7.
- 2) 富所達哉, 権守英樹, 米沢実, 守田聡: 長距離シールドの設計・施工におけるリスクマネジメント, トンネルと地下, vol.37, No.7, pp.26-33, 2006.7.