

カッタービットの耐久性向上に関する研究 —新素材カッタービットの研究開発と実証結果—

Study on Durability improvement of Cutter-bits

○志村 和伸*・桐谷 祥治*・三谷 典夫**・川合 一成**
Kazunobu SHIMURA, Yoshiharu KIRITANI, Norio MITANI, Kazunari KAWAI

The paper introduced the newly developed cutter bits with shock resistance and abrasion resistance.

Cemented carbide tip which has high hardness with high transverse rupture strength is used as a part of the cutter bits to improve durability.

Shape of tip, embed manner and weld manner of tip-shank is also studied as well as tip material itself so as to improve the shock resistance.

Data analysis from site explicates sufficient shock resistance and abrasion resistance.

keywords: shield machine, cutter bits, cemented carbide tip, shank, durability, shock resistance, abrasion resistance

1. はじめに

近年、シールド工事の長距離化に伴い、シールドの耐久性とりわけカッタービットの耐久性に関する検討が重要となっている。掘進途中でカッタービットを交換する場合には、カッター前面での作業となり、切羽地山の自立性を確保するための地盤改良等の補助工法が必要となるため、工期的・経済的に大きな負担を強いられることとなる。

カッタービットの耐久性を向上するためには、カッタービットの摩耗メカニズムを解明することが必要である。しかし、カッタービットの摩耗状態は掘進土質だけでなく、シールド工法やカッターヘッドの形状、カッタービットの配置、掘進状況等の要因が複雑に関係するものと想定され、カッタービットの摩耗メカニズムは十分に解明されるには至っていない。したがって、カッタービットの耐久性を向上するためには様々な観点から対策を検討する必要がある。

本研究はそのうちのひとつとして、カッタービット本体の耐久性向上を目的として検討したものである。カッタービット本体の耐久性、すなわち耐摩耗性と耐衝撃性を高めるためには、超硬チップの硬度と抗折力をバランス良く高め、かつシャンク材(母材)も超硬チップ強度に見合うように補強する必要がある。現在では、硬度と抗折力がともに優れた超硬チップが開発されており、室内試験では耐摩耗性および耐衝撃性のいずれにおいても良好な結果が得られるまでになっている。しかしながら、この超硬チップを用いて製作した長距離対応カッタービットを実施工に適用すると、礫の衝撃等によるものと思われる超硬チップの欠損または脱落の事例が多く見られており、実用化へ向けて検討すべき課題が残されていた。

本研究ではカッタービットの耐衝撃性を向上するために、新素材チップの材質に加えて、チップの形状や

* 正会員 佐藤工業株式会社

** 株式会社小松製作所

チップとシャンク材の貼り付け形状と貼り付け方法、および硬化肉盛の材質等についてさらに研究を進め、衝撃に対しても十分な耐久性を保持できる長距離対応カッタービットを開発した。この新しく開発したカッタービットを実施工に適用したところ、耐衝撃性、耐摩耗性とも良好な結果を得ることができた。

本論文は新素材カッタービットの開発に関わる研究と新素材カッタービットの概要、および実施工への適用結果を紹介するものである。

2. カッタービット仕様の考え方

2・1 カッタービットの基本構造と損耗形態

シールド工事用のカッタービットは、シャンク材(母材)の先端に超硬合金をろう付けして一体としたものを用いている。超硬合金は主として炭化タングステンとコバルトの粒子を焼結した合金であり、一般に硬度は H_{RA}(ロックウェルAスケール)で86以上と非常に硬く、優れた耐摩耗性を有している。またシャンク材は一般に炭素鋼、工具鋼が用いられ、必要に応じて H_{RA}80程度の炭化クロム-鉄系硬化肉盛等で保護している。カッタービットは一般の金属切削用バイトと同様、刃先にすくい角、逃げ角を有する形状であるが、金属切削と異なる点はカッターヘッドが左右両方向に回転するため、各回転用のカッタービットが同一軌跡に配置されることである。

カッタービットの損耗形態としては、超硬チップ、シャンク材の摩耗および超硬チップの脱落、欠損がある。摩耗は、通常の切削におけるすくい面、逃げ面の摩耗に加え、上記カッタービットの配置から非切削側カッタービット逃げ面で土砂圧密流動による摩耗が相対的に大きく、カッタービット全体としては図-1に示す様な摩耗進行形態となる。図中④はシャンク材まで摩耗が進行した、いわゆる歯槽膿漏状態を示す。

超硬チップの脱落、欠損は、上記シャンク材の歯槽膿漏的な摩耗進行による超硬チップろう付面積の減少によるもの、および礫・岩の切削、衝突時の衝撃により発生しているものと考えられる。

2・2 カッタービットの耐久性向上

(a) 耐摩耗性の向上について

1) 超硬チップ

超硬チップは炭化タングステンの含有量を多くし、コバルトの含有量を少なくするほど硬度が高くなり、耐摩耗性が向上することが知られているが、反面微細な内部欠陥等も発生しやすくなり、耐衝撃性(抗折力や靱性)が低下することとなる。この相反する事象を解消するため、炭化タングステン粒度の変更や焼結時の粒成長を抑制するSinter HIP処理の採用等、種々の研究開発が行われ、高硬度・高抗折力の新しい超硬チップの製作が可能となった。

表-1に従来品と開発品の超硬チップ単体の硬度、抗折力の比較を示すが、開発品は従来品と同等またはそれ以上の性能を示している。なお表中の耐摩耗比は、これらの超硬チップを用いた実機用カッタービット

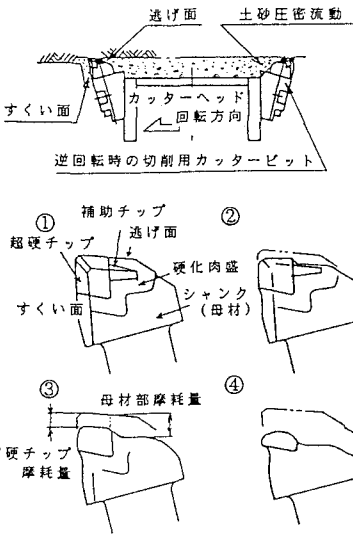


図-1 カッタービットの摩耗進行形態

表-1 超硬チップの材料特性

区 分	J I S 分類記号	硬度 H _{RA}	抗折力 kgf/mm ²	耐摩耗 比	(参考) JISM3916規定値	
					硬度	抗折力
従来品	E 5種相当品	86.5	320	1.0	E 5種 ≥86	≥200
開発品	E 3種相当品	88.5	300	1.3	E 3種 ≥88	≥160
	E 2種相当品	90.3	310	2.6	E 2種 ≥89	≥140

を図-2に示す装置で実施した摩耗耐久試験結果によるものである。表-1に示すように、開発品E3種相当品、E2種相当品（以降、開発品E3種、開発品E2種と称す）とも優れた耐摩耗性を示し、従来品E5種（以降E5種と称す）に比較して1.3～2.6倍の耐摩耗性を有することが判明した。

2) 硬化肉盛

カッタービットの耐摩耗性を向上させるためには、超硬チップの耐摩耗性のみならずシャンク部も超硬チップ耐摩耗性向上に見合うだけの方策を施す必要があるため、シャンク材表面の硬化肉盛について材料および肉盛方法について開発を実施した。その結果、炭化タングステン(WC)粒子または超硬粒子等を肉盛材料に含有させるWCガス溶着や超硬分散肉盛方法を見いだした。表-2にその材料特性を示す。さらにその肉盛供試体を超硬チップと同様、図-2に示す試験装置により摩耗耐久試験を実施したところ、従来の硬化肉盛に対し1.8～3.0倍の耐摩耗性を有するとの結果が得られた。特に、超硬分散肉盛は肉盛時の入熱量と超硬粒子の供給量をコントロールすることで、超硬粒子を肉盛層へ均一に分布させることが可能となり、硬化肉盛の初期摩耗が極めて少なくなることが判明した。

なお、硬化肉盛については摺動時の脱落、剥離はなく、従来品と同等の耐衝撃性を有することが判明した。

(b) 耐衝撃性の向上について

新素材カッタービットの実施工現場への適用結果、および前述の摩耗耐久試験で超硬チップに亀裂が発生した試験片を分析した結果、耐衝撃性低下は超硬チップとシャンク材の熱膨張係数の差による、ろう付け時の残留応力が主要因の一つとの見解が得られた。さらに残留応力の大小は超硬チップの大きさ、形状、取付方法およびろう付け時の温度管理等が関係していることが明らかとなった。

1) 超硬チップの形状および取付方法

超硬チップは耐摩耗性の点から大きくすることが必要であるが、超硬チップ体積が増加すると残留応力も増加する。種々の実験の結果、超硬チップの大きさは、幅100mm程度、高さ50mm程度までなら残留応力も少ないことがわかった。また超硬チップの取付方法については、図-3に示すように、ろう付け部が3面拘束となる差し刃より、貼刃形式として2面拘束にとどめることが残留応力低減には有利であることが判明した。さらに応力集中の生じやすい稜線部と角部をそれぞれR形状と面取り形状にすること等により残留応力の低減を図ることとした。

2) ろう付け方法

残留応力低減の最も重要な方策として、ろう付け時の温度管理が挙げられる。特にろう付け後の冷却工程における保持温度、冷却速度等は残留応力を左右する大きな要因である。これらについて超硬チップ、シャンク材およびろう材料の冷却特性をもとに各種冷却方法を検討し、水準試験片での耐衝撃性評価試験を行った。この結果、冷却速度をコントロールすることで残留応力を低減できることが判明した。

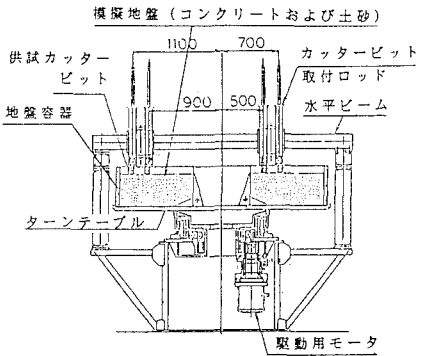


図-2 摩耗耐久試験装置

表-2 硬化肉盛材料の材料特性

区 分		耐 摩 耗 比	特 徴
従 来 品		1.0	炭化クロム-鉄系の肉盛材料
開 発 品	WCガス溶着	1.8	炭化タングステン破砕片を鉄系肉盛材料に配合
	超硬分散肉盛	3.0	超硬粒子等を鉄系肉盛材料に分散配合



(a) 貼り刃 (b) 差し刃

図-3 超硬チップの取付方法

3) 耐衝撃性試験

上記1)2)項での検討評価に基づき、実機用カッタービットを製作し、超硬チップ先端に0～10 tの繰返し荷重を負荷する強度耐久試験を実施した。図-4に試験装置を示す。その結果、1)2)項で得られた最適条件を組み合わせることにより繰返し回数で10⁶回以上においても割れや欠損のないことが確認できた。

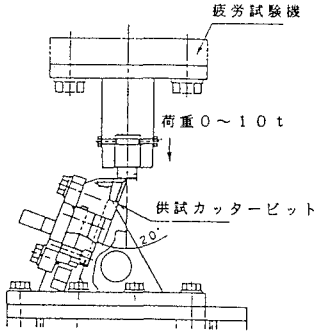


図-4 強度耐久試験装置

3. 実施工現場への適用による耐久性の確認

2章における各種検討と試験結果から、耐衝撃性が従来品と同程度で耐摩耗性に優れた長距離対応カッタービットの開発に目途がついたため、図-5に示すカッタービットを製作し、実施工による性能確認を実施することとした。

3・1 適用工事の概要

新開発カッタービットの性能は2件の実施工現場で検証した。

適用工事1の工事概要ならびに土質条件を表-3に、カッタービットの配置図を図-6に、カッタービット材種と装備数量の一覧を表-4に示す。

シールド掘進断面付近の土質は最大礫径 400mm、礫率85%以上、細粒分含有率 8%未満の沖積砂礫層である。透水係数は10⁻²cm/sec以上で地下水も豊富である。ボーリング削孔中には孔壁崩壊が頻繁に生じ、自立性に乏しい地盤条件である。本工事では掘進延長約400m毎に、2回のビット交換を行った。両交換時とも、外周部の

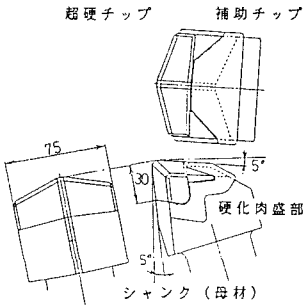


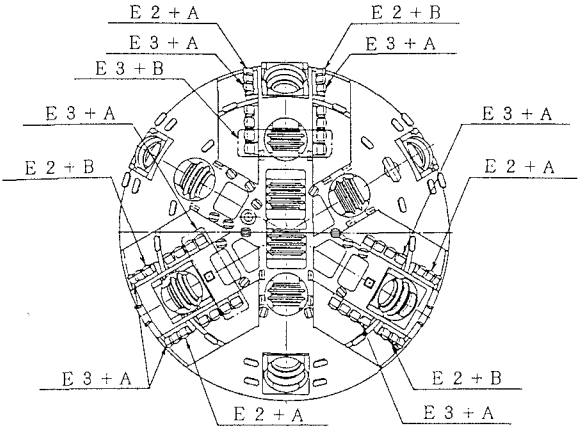
図-5 実証工事用カッタービット

表-3 適用工事1 工事概要・土質条件

工 法	泥土圧シールド
シールド外径	φ 2,672 mm
仕上り内径	φ 1,800 mm
掘進延長	1,085 m
土 質	沖積砂礫層
土 被り	18.71～19.03m
地下水位	G.L-5.85～7.30m
透 水 係 数	10 ⁻² cm/S
N 値	40～50以上
礫、最大礫径	400 mm
種 類	凝灰岩、安山岩、硬砂岩
質、一軸圧縮強度	2,000(721～3,700kgf/cm ²)

ディスクカッターとカッタービットは限界近くまで摩耗が進行していた。

本工事では掘進当初より内周部に開発品E3種ビットを装備し、2回目のビット交換時に最外周部と外周部に開発品E3種ビットと開発品E2種ビットを装備した。また開発品の一部に超硬分散を施した。



凡 例

E 2	開発品E 2種
E 3	開発品E 3種
A	超硬分散
B	WCガス溶着
その他	チップ：従来品E 5種 硬化肉盛：Cr-C系

図-6 適用工事1 カッタービット配置図

適用工事2の工事概要ならびに土質条件を表ー5に、カッタービットの配置図を図ー7に、カッタービット材種と装備数量の一覧を表ー6に示す。

シールド掘進断面付近の

土質は第三紀の砂層、砂礫、粘性土層の複合地盤である。本工事は発進立坑から 607 mの上流側と、 853mの下流側掘進に分かれている。今回報告する適用結果は下流側区間における実績である。下流側の主要掘進土質は第三紀砂層で、N値は30～50以上と密な地盤である。

本工事では掘進当初より、外周部・最外周部に開発品E3種と開発品E2種を装備しており、その全てに超硬分散を施している。

表ー5 適用工事2 工事概要・土質条件

工 法	泥土圧シールド
シールド外径	φ 2,280 mm
仕上り内径	φ 1,500 mm
掘進延長	853 m
土 質	砂層・砂礫・粘土層(第三紀)
土 被 り	7.09～14.27m
地下水位	G.L-1.50～6.45m
透水係数	1.3×10^{-5} cm/S
N 値	20～50以上
最大礫径	80 mm

3・2 適用実績

(a) チップの欠損状況

適用工事1の砂礫地盤では外周部・最外周部に装備した開発品の一部にチップ欠損が見られた。欠損したカッタービットの数は表ー7に示すように、開発品E3種で6本中1本、開発品E2種で6本中3本である。欠損カッタービット位置は図ー8に示すように、ドーム型カッターヘッドのR部で、欠損箇所は超硬チップすくい面側のろう付け部近傍であった。

適用工事2の砂質地盤では、開発品E3種の10本と開発品E2種の12本の全てに欠損は見られなかった。

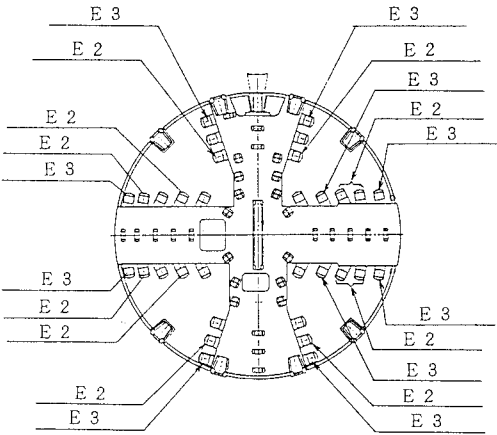
(b) チップの摩耗実績

図ー9は適用工事1におけるE5種と開発品E3種・開発品E2種の摩耗実績を示している。図中破線で囲んでいる部分が発進当初からカッターヘッド内周部に装備していた開発品E3種を示し、同じく

表ー4 適用工事1 カッタービット材種一覧

No.	従来品	No.1	No.2	No.3	No.4
超硬チップ	E5種相当	E3種相当	E3種相当	E2種相当	E2種相当
硬化肉盛	Cr-C系	超硬分散	WCガス溶着	超硬分散	WCガス溶着
母材材質	S45C	S45C	S45C	S45C	SKC24
装備数	STEP-1	34	4	4	――
	STEP-2	34	4*	4*	――
	STEP-3	22	10*	4*	3

注1) STEP-1は発進から第1回点検まで、STEP-2は第1回点検から第2回点検まで、STEP-3は第2回点検から到達までの区間を示す。
注2) ※印は新素材ビットにおいて、STEP-1からの継続使用が含まれることを示す。



凡 例

E2	チップ: 開発品E2種 硬化肉盛: 超硬分散
E3	チップ: 開発品E3種 硬化肉盛: 超硬分散
その他	チップ: 従来品E5種 硬化肉盛: Cr-C系

図ー7 適用工事2 カッタービット配置図

表ー6 適用工事2 カッタービット材種一覧

No.	従来品	No.5	No.6
超硬チップ	E5種相当	E3種相当	E2種相当
硬化肉盛	Cr-C系	超硬分散	超硬分散
母材材質	S45C	SKC24	SKC24
装備数	10	10	12

表－7 適用工事 1 欠損カッタービット

数量一覧(欠損数/装備数)

取付位置	開発品 E 3 種	開発品 E 2 種	転走距離(km)
内周部	0 / 8	—	294~363
外周部	1 / 6	3 / 6	87~116
合 計	1 / 14	3 / 6	—

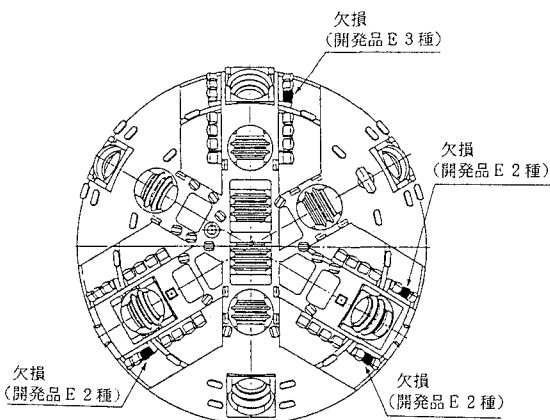
実線で囲んでいる部分が第2回目のビット交換時に最外周・外周部に装備した開発品 E 3 種と開発品 E 2 種を示している。

図に示す通り、開発品 E 3 種の最大摩耗係数は $12.9 (10^{-3}\text{mm/km})$ で、E 5 種チップの最大摩耗係数は $38.5 (10^{-3}\text{mm/km})$ であった。

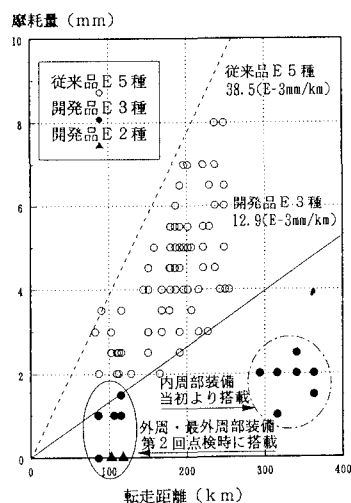
図－10は、第2回点検時に交換したカッタービットの摩耗データをプロットし、同一掘進条件下での E 5 種チップと開発品 E 3 種・開発品 E 2 種チップの摩耗実績を比較して示したものである。転走距離は短いですが、ここで得られる摩耗係数は E 5 種が $17.7 \sim 38.5 (10^{-3}\text{mm/km})$ 、開発品 E 3 種が $0 \sim 12.9 (10^{-3}\text{mm/km})$ である。

開発品 E 2 種チップの摩耗量は測定限界以下であり、到達時に検査したところチップに施した稜線交点部の面取り形状も完全に残っていた。最大摩耗係数で耐久性を評価すると、開発品 E 3 種チップは E 5 種チップに対して、約 3.0 倍の耐摩耗性を示している。

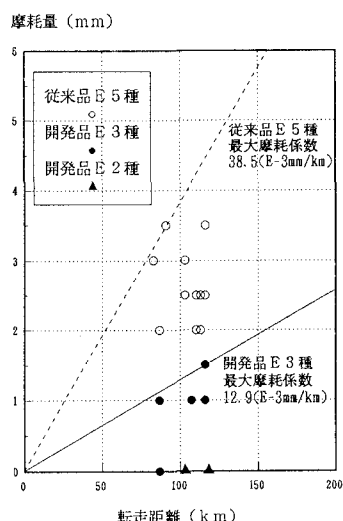
図－11は適用工事 2 における摩耗実績を示している。E 5 種チップの摩耗係数は $10.1 \sim 22.6 (10^{-3}\text{mm/km})$ 、開発品 E 3 種チップの摩耗係数は $8.6 \sim 17.2 (10^{-3}\text{mm/km})$ 、開発品 E 2 種チップの摩耗係数は $2.4 \sim 7.2 (10^{-3}\text{mm/km})$ の範囲で分布している。最大摩耗係数で耐久性を評価すると、 $E 5 : E 3 : E 2 = 1.0 : 1.3 : 3.1$ となっている。



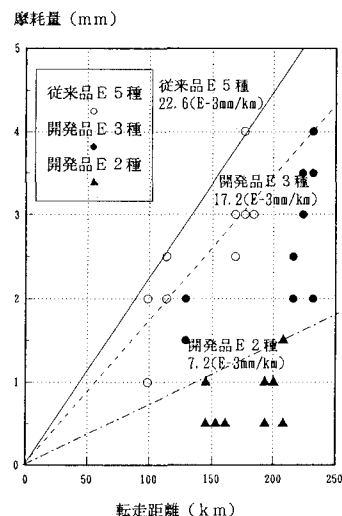
図－8 適用工事 1 欠損カッタービット位置図



図－9 適用工事 1 チップ摩耗実績 (その 1)



図－10 適用工事 1 チップ摩耗実績 (その 2)



図－11 適用工事 2 チップ摩耗実績

(c) 硬化肉盛の摩耗実績

図-12に適用工事1の硬化肉盛摩耗量の実績を示す。最大摩耗係数は、従来品が $71.4 (10^{-3} \text{mm/km})$ 、WCガス溶着が $48.5 (10^{-3} \text{mm/km})$ 、超硬分散が $42.1 (10^{-3} \text{mm/km})$ となっている。超硬分散は従来品と比較して約1.7倍、WC溶着との比較で約1.2倍の耐摩耗性を示している。

図-13は、同じく適用工事2の硬化肉盛の摩耗実績である。従来品の硬化肉盛は1.5mm～3mm摩耗していたが、超硬分散の摩耗量は測定限界以下であり、硬化肉盛表面には超硬粒子のつぶが残っている状態であった。

4. 考 察

本章では、開発品ビットを実施工で検証した結果と今後の展望について考察する。

4・1 耐衝撃性

開発品E3種カッタービット 適用工事1 硬化肉盛摩耗実績 適用工事2 硬化肉盛摩耗実績
はディスクカッターが限界摩耗に達するような玉石混じり礫地盤(適用工事1)において、装備した14本のうち外周部の1本のみに欠損が見られた。また、砂質地盤(適用工事2)では装備した10本のカッタービット全てにチップ欠損はなかった。

欠損した開発品E3種カッタービットを調査したところ、チップろう付け時の残留応力による耐衝撃性の低下によるものが主原因と判明した。今後より厳密な残留応力管理を行うことで、さらに開発品の信頼性を向上していけるものと考えられ、開発品E3種カッタービットは礫地盤にも適応可能なレベルに達したものと判断している。

開発品E2種ビットは砂礫地盤で6本中の3本が欠損したが、砂質地盤では装備した12本にチップ欠損は見られなかった。現段階では、開発品E2種ビットは耐衝撃性の点で、礫地盤への適用には課題が残されているものと考えている。しかしながら、適用工事2の様な小径の砂礫層や砂層に限定して適用することは可能であるとする。引き続き、材質や形状の改良、およびチップ製作時およびチップ貼り付け時における管理方法を検討することで、さらに開発品E2種カッタービットの適用地盤の拡大を図ってゆく所存である。

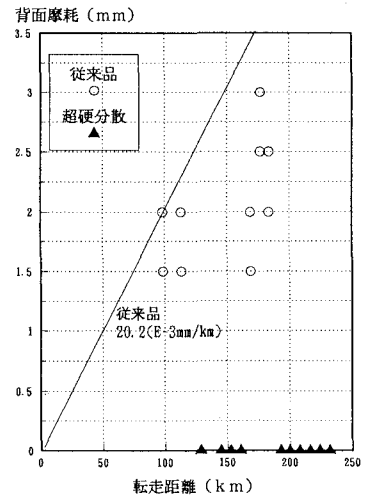
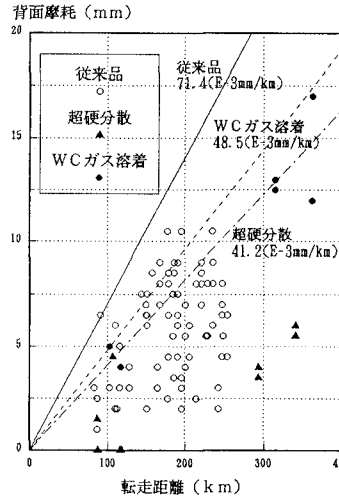
4・2 耐摩耗性

砂礫地盤において開発品E3種ビットは従来品と比較して約3.0倍の耐摩耗性を示し、砂質地盤において開発品E3種ビットが従来品の約1.3倍、開発品E2種ビットが従来品の約3.1倍の耐摩耗性を示した。転走距離は短いものの、実施工における検証結果は摩耗耐久試験値と同等、もしくはそれ以上の耐摩耗性が得られた。

超硬分散硬化肉盛は砂礫地盤において従来品の1.7倍と、摩耗耐久試験値の摩耗比3.0倍よりも耐摩耗性が劣ったものの、砂質地盤では853mのシールド掘進に対して摩耗量が測定限界以下であり、優れた耐摩耗性を示したと判断している。

4・3 今後の展望

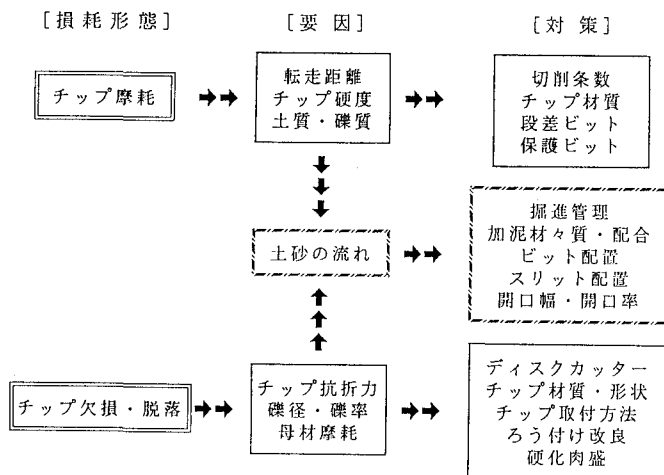
今回の実証結果から、開発品E3種カッタービット、開発品E2種カッタービットとも、適用地盤を考慮して採用するならば、従来品に比べて優れた耐久性が得られることを確認することができた。さらに、実施



工での適用実績を積みながら改良を重ねることで、長距離対応カッタービットとしての信頼性を高めていけるものと考えている。

なお、前述のように、カッタービットの耐久性はカッタービット本体の耐久性以外にも種々の要因が関係しているものと考えている。図-14は摩耗実績データを検証して、カッタービットの損耗形態と要因、および対策に分けて表現した摩耗メカニズムの概念図である。図に示すように、カッタービットの耐久性を向上するためには、チップ材質や硬化肉盛の改良だけでなく、シールド設計・シールド施工面で数多く検討すべき事項が残されていることがわかる。

カッタービットの耐久性を向上するためには、カッタービットへの負荷を軽減すること、すなわち切削土砂をカッタービット周囲に滞留させることなく、滑らかに取り込むことが特に有効な対策であると考えている。過去の摩耗実績データからも、カッタービットの取付位置とスリットの相対位置関係



や、切削条数、カッタービットの段差配置などによって、摩耗度合いの違いが認められている。すなわち、カッタービットの耐久性を向上するためには、スムーズな「土砂の流れ」を確保するカッターヘッド形状、スリット配置、カッタービット配置、および加泥材の選定等といった施工技術面からのアプローチと、チップや硬化肉盛といった材質面からのアプローチを考えることができ、両者をバランス良く織りまぜた研究が必要であると考えている。

今後、新素材の研究と併せて、カッタービット摩耗データを蓄積するとともに、さらに分析を進め、カッタービットの摩耗メカニズムを定性的・定量的に把握すべく研究を続けていく所存である。

5. おわりに

本開発品カッタービットは現在も適用工事2の上流側砂礫地盤において検証中である。今後も開発品カッタービットを積極的に適用していく予定であり、実証結果については随時報告していきたいと考えている。最後にあたり、新素材カッタービットの開発および適用検証に際してご助言・ご協力を賜った関係各位に感謝の意を表する。

6. 参考文献

- 1) 勝山他：粗大礫層におけるシールドカッタービットの耐久性について，土木学会第43回年次学術講演会講演概要集第6部，pp. 156～157，1988. 10.
- 2) 志村，桐谷：シールドのカッタービットの耐久性に関する研究，土木学会トンネル工学研究発表会論文・報告集第1巻，pp. 147～152，1991. 12.
- 3) 橋爪他：玉石混じり礫層におけるビット耐久性に関する検討と点検結果，土木学会第49回年次学術講演会講演概要集第3部，pp. 1, 404～1, 405，1994. 9.