

23. シールドマシンにおけるビットの再利用技術

大成建設株式会社
株式会社丸和技研
有明工業高等専門学校

○ 高倉 克彦
佐々木 誠
岩本 達也

1. はじめに

シールドマシンのカッタービット（以下、ビットと略す）の先端部にはレアメタルであるタングステンカーバイドやコバルトを主成分とする超硬合金（以下、超硬チップと呼ぶ）が配置されているが、掘進を終えたシールドマシンのうち、ビットを含むカッターヘッド（写真-1 参照）などはスクラップ処分されるのが一般的である。

しかし、掘進を終えたビットの目視観察では、超硬チップに割れや欠けがなく、摩耗量が少ないものも多く、再利用に供することが十分可能と考えられる。また、使用済みビットの再利用が可能になれば、レアメタルの有効利用及びCO₂排出量の削減に寄与できると考えられる。

そこで、使用済みビットの健全性を評価する技術を開発した。以下にその概要を示す。

2. ビットの構造

図-1 にビットの標準的な構造図を示す。カッターヘッドに直接溶接やボルト締結によって取り付けられる部位は母材と呼ばれ、SS材やSKC材などの鋼材が用いられる。この母材の先端部に超硬チップは配置されており、母材と超硬チップの接合には、銀ろうを用いたろう付がなされている。

超硬チップの厚みは2cm程度、幅は10cmから20cm程度、長さは当該工事の条件によって予め予測される摩耗量と根入れ長から決定され、4cmから10cm程度である。

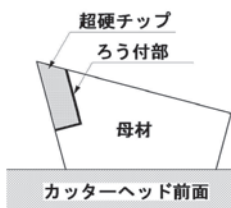


図-1 ビット側面図

3. ビットの健全性評価方法

図-2 に示す使用済みビットの健全性評価フローに沿って、概要を説明する。

3.1 外観検査

回収した使用済みビットに対して、まず、目視による外観検査を行う。超硬チップに割れあるいは欠けが認められるものについては、超硬チップ



写真-1 カッターヘッド例

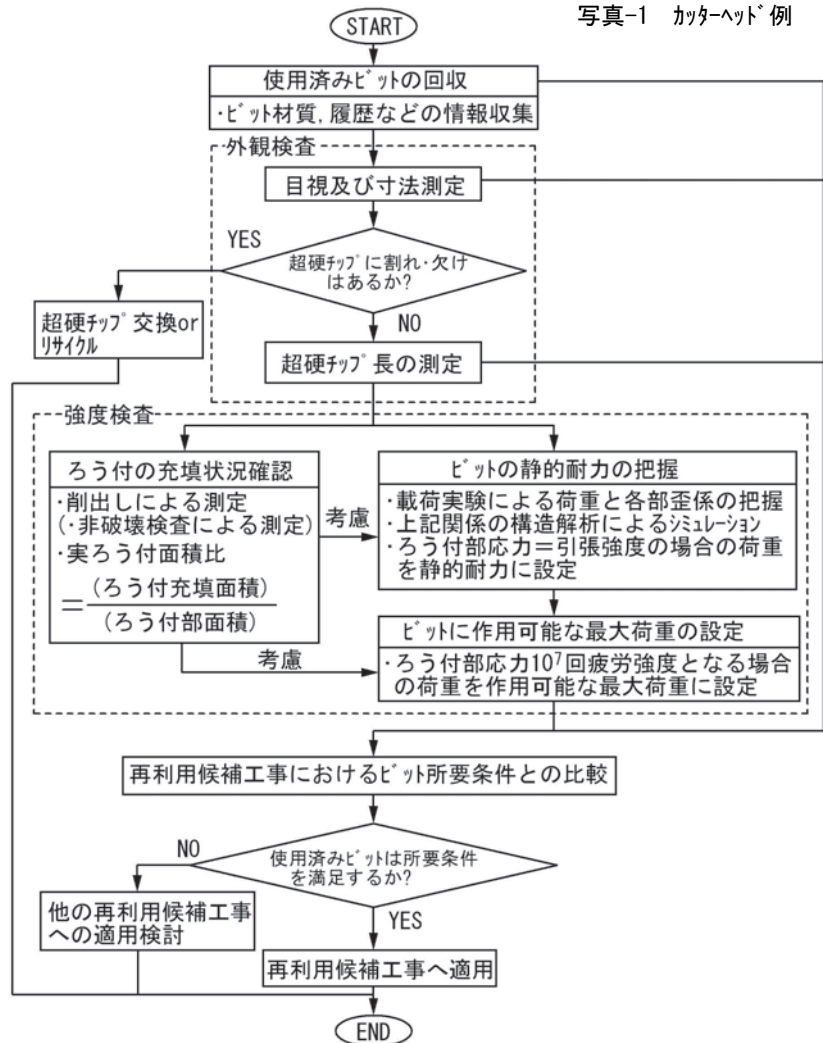


図-2 使用済みビットの健全度評価フロー

の付け替えによる補修対象などとする。なお、母材の摩耗については、肉盛りを比較的容易に行うことができることから、再利用の候補に残す。

試験的に回収したビットの外観検査では約25%のビットが手直しを行わずに再利用可能と判定された。次に、再利用候補のビットについて超硬チップの残存長を測定し、再利用対象工事にて必要とされる超硬チップ長との比較評価項目とする。

3.2 強度検査

超硬チップの強度は母材ならびにろう付の強度に比べて非常に大きく、割れ・欠けが認められなければ強度的に母材ならびにろう付に比べて健全度は高いと考えられる。

地盤切削時に超硬チップが受ける力が次に伝達されるのは超硬チップと母材を接合しているろう付部であり、強度面ではろう付部の健全性を評価項目とする。掘進を終えたビットの損傷状況を見ると、超硬チップの母材からの脱落も見られ、この状況は掘進機能を大きく阻害する要因となる。

ここで、ビットが地盤の掘進中に受ける作用荷重は、繰返し荷重と考えられることから、ろう付部の強度の評価は疲労強度について行う。また、ろう付部に関しては、ろう付の際の溶融したろうの接合面への充填性を踏まえた評価を行う。

なお、新品のビットに対する強度は、メーカーが保障するものとなっており、メーカーによっては100kN程度の静的荷重を行っている場合もある。

(1) ろう付部疲労強度の推定

ろう付部の疲労強度を把握するために疲労試験を実施した。疲労試験では、20Hz サイン波を引張側片振りの荷重制御にて荷重した。「鋼道路橋の疲労設計指針」（日本道路協会）では、繰返し回数 2×10^6 回における応力を基本としていることから、ここでは未破断設定回数を 1×10^7 回として試験を行い、繰返し回数 1×10^7 回における疲労強度をろう付部の疲労強度として用いることとした。図-3 に S-N 線図を示す。

ろう付の繰返し回数 1×10^7 回における疲労強度は 239 N/mm^2 となり、引張強度の約 44% となっている。なお、超硬チップの繰返し回数 1×10^7 回にお

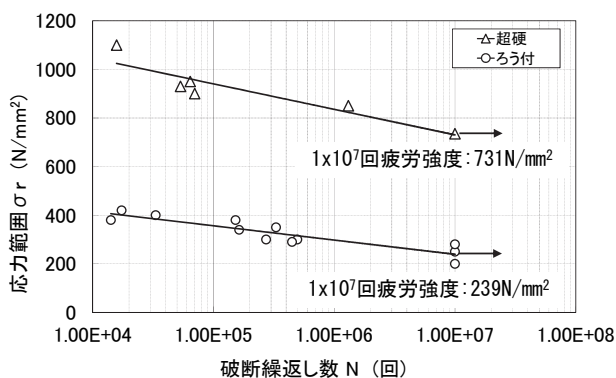


図-3 S-N線図

ける疲労強度はろう付の約3.1倍となっている。

(2) ビットに作用可能な最大荷重の推定

ビット強度の確認項目としてろう付強度を取り上げているが、再利用候補の工事の情報において、ビットに作用する荷重は地盤を切削するために必要な力であり、地盤強度に相当すると考えられる。

ビットに作用する荷重によってろう付部に発生する応力の関係を求めれば、地盤強度とろう付部の強度を間接的に比較することが可能となる。

1) ビット載荷試験及びFEM解析

使用済みビットの静的荷重載荷試験を行い、ろう付部付近の歪の測定を行った例を以下に示す。荷重方向については、ビットの切削方向（主分力方向）とシールドマシンの掘進方向（背分力方向）とした。

また、構造解析によって上記の載荷実験における荷重と歪の関係を把握した。解析モデル図を図-4に、解析条件を表-1に示す。

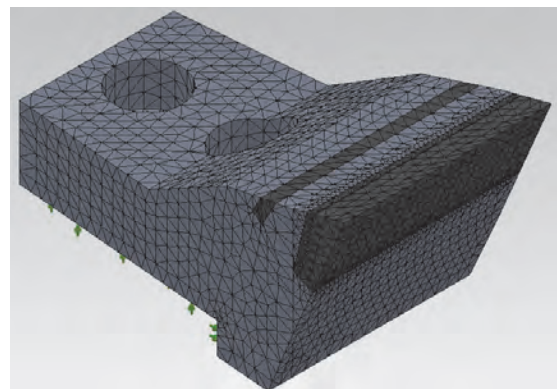


図-4 解析モデル図

表-1 解析条件

項目	単位	母材	超硬チップ
		SKC24	E5
弾性係数	N/mm ²	210,000	560,000
ポアソン比	—	0.28	0.22
密度	kg/m ³	7,800	14,400

図-5に、荷重と各部の歪の関係について計測値と解析値の比較図例を示す。解析値は計測値を良好な精度で再現していると考えられる。

2) ろう付部の状況に対する対処

FEM解析によってろう付部の応力状態を推定し、その値がろう付の 1×10^7 回疲労強度となる荷重をそのビットに作用可能な最大荷重とするが、ろう付部には、写真-2に示すような空隙が存在することから、ろう付部応力の解析値を、実ろう付面積比(=ろう付充填部面積/ろう付部面積)で補正する。

載荷試験を行ったビットについて、ろう付部の

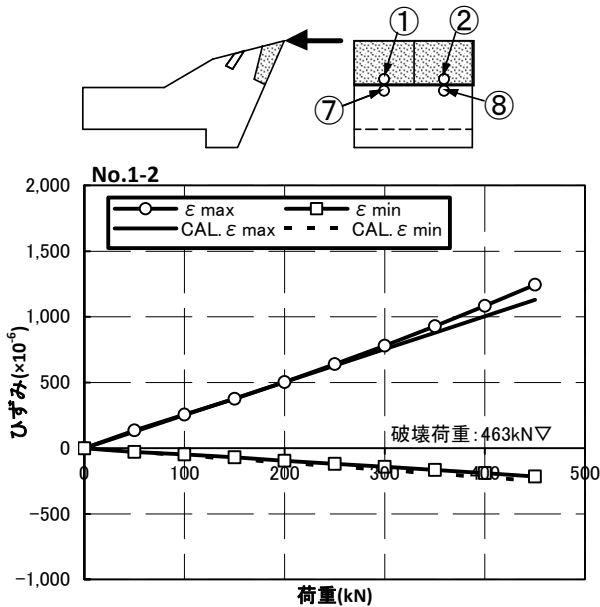


図-5.1 切削方向荷重-歪関係 (①②平均値)

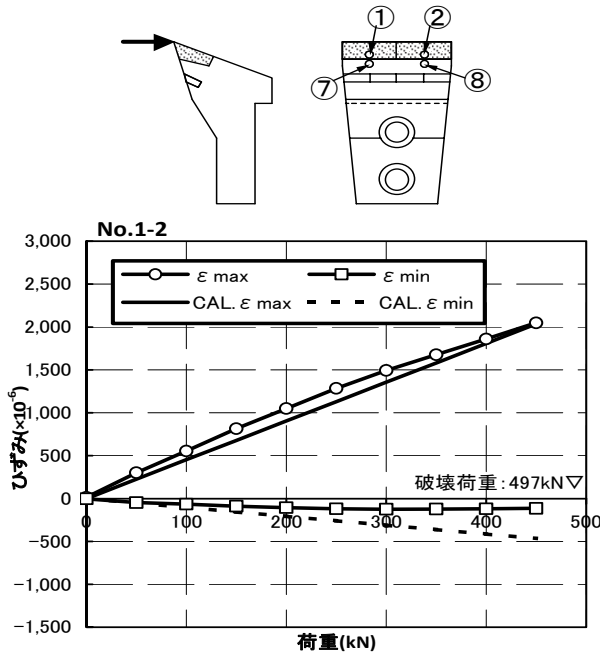
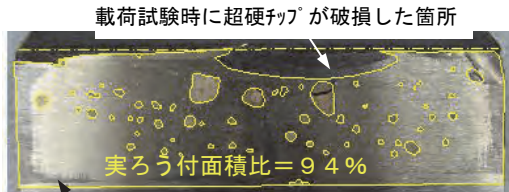
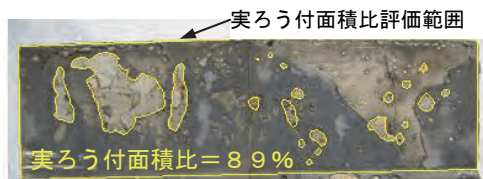


図-5.2 掘進方向荷重-歪関係 (①②平均値)



実ろう付面積比評価範囲

写真-2.1 ろう付部の空隙箇所 (切削方向)



※載荷試験時にろう付面にて破壊したため、母材側と超硬チップ側の状況から空隙箇所を判断
写真-2.2 ろう付部の空隙箇所 (掘進方向)

応力が 1×10^7 回疲労強度となる最小荷重は、掘進方向に対する 174kN となり、このときの実ろう付面積比は 89%であった。

例えば、実ろう付面積比が 50%の場合にはそのビットに作用可能な最大荷重を $98\text{kN} (=174\text{kN} \times (50\%/89\%))$ に設定する。

ここで、再利用対象工事の掘進土層の一軸圧縮強度が土丹相当の 5N/mm^2 の場合を想定する。一軸圧縮強度分の力を与えることで、地盤の切削が可能とすれば、ビット幅 100mm、ビットと地盤の接触幅を 10mm とすると、作用荷重は $5\text{kN} (=5\text{N/mm}^2 \times 100\text{mm} \times 10\text{mm})$ となる。

この荷重がビット先端に載荷試験と同様に作用するものとして、前述のビットの作用可能最大荷重との比較を行うと、実ろう付面積比が 50%の場合のビットの持つ安全率 F_s は $F_s = 98\text{kN} / 5\text{kN} = 19$ となる。

このように、ビットの持つ安全率は非常に大きいと考えられる。これは、ビットにおける超硬チップが耐摩耗の観点から設計されていることによるものと考えられる。

4. ろう付部の非破壊検査方法

ろう付部の空隙の状況はろう付時の状況によって、ビット毎に異なると考えられることから、ビットを再利用するには個々のビットのろう付部の状況を推定しておく必要がある。そこで、超音波探傷による非破壊検査方法の適用を考えた。

図-6 に測定原理を示す。探触子から送信された超音波はろう付部内にある空隙部の境界面ではほぼ 100% 反射し(伝播経路②)、その音圧(エコー高さ)は超合金とろう付部の界面での反射波(伝播経路①)と比べて強い値となる。

図-7 に示すビットをモデル化した供試体に対して超音波探傷を行った結果とろう付部を削出した状況写真を図-8 に示す。音圧の評価をろう付面全体に対して一様に行うことが重要であることから、超硬チップの厚さが変化する場合には、図-8 より焦点距離ならびに減衰に対する補正を行っている。推定された空隙と実際のろう付面における空隙部の大きさや形状が良く一致していることが確認できる。

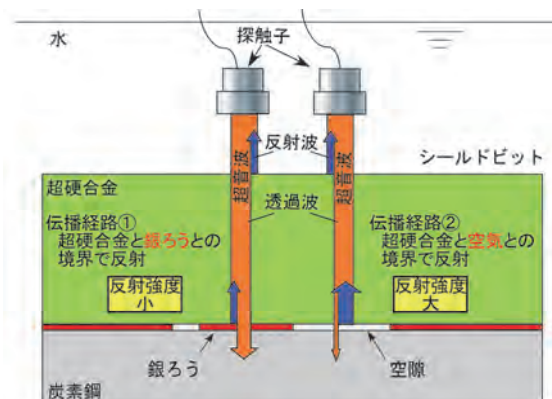


図-6 超音波探傷の測定原理

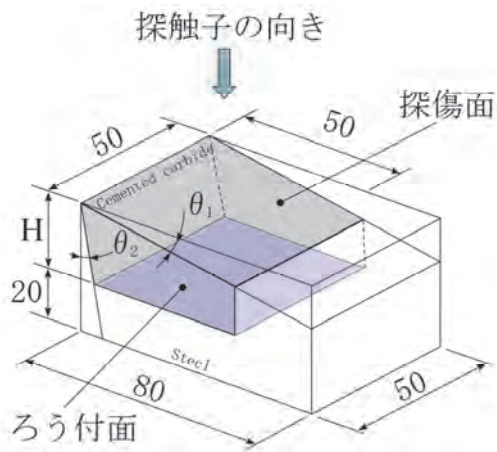
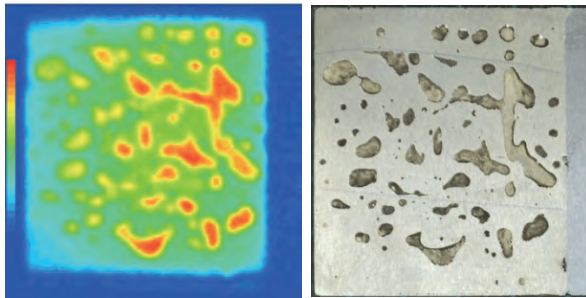


図-7 供試体概要図



(a) 探傷画像 (b) ろう付面

図-8 測定結果 ($\theta_1=10^\circ$)



写真-3 再利用ビット取付状況

5. 実機搭載掘進後の再利用ビットの状況

工事名称は大井有明付近連系管路新設工事（発注者：東京電力株式会社殿）であり、土丹層及び砂礫層中を掘削外径4.12mで約1,400m掘進する工事であった。

写真-3に再利用ビット取付状況、写真-4に掘進前のシールドマシン面板状況、写真-5に掘進完了後のビット状況ならびに写真-6に掘進後のシールドマシン面板状況を示す。

掘進完了後の再利用ビットとマシンメーカー製作ビットの比較を行ったが、双方とも欠損等は同様な状況だった。

6. おわりに

本技術は、CO₂排出量削減、再利用によるレアメタルの使用量削減に寄与することを目的として開発したものであり、今後実績を積み重ねて普及させていきたいと考えている。

なお、本技術は、福岡県リサイクル総合研究センター（現 福岡県リサイクル総合研究事業化センター）のレアメタルの3Rに関する助成により、大成建設㈱、㈱丸和技研、福岡県工業技術センターならびに有明工業高等専門学校と共同で開発したものであり、関係各位に謹んで御礼申し上げます。



写真-5 掘進完了後のビット状況

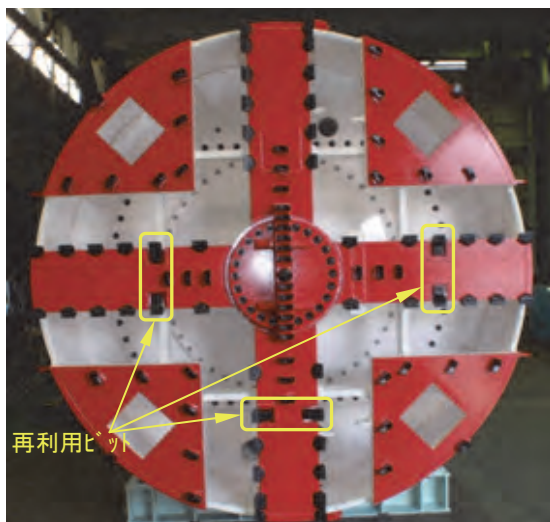


写真-4 シールドマシン面板(掘進前)



写真-6 シールドマシン面板(掘進後)