

高耐久性ビット（スタミナビット）の開発

Development of High Durability Cutter Bits for Tunnel Boring Machines

川嶋英二* 犬飼 貴** 木下茂樹** 星 智久***

要 旨

近年シールド工事の大口径、長距離化が進んでいる中で、掘削性能を左右する超硬ビットの性能を向上させることが、シールド工事における課題として挙げられる。これまでカッタービットの材質や交換方法等の研究を進めてきたが、耐久性に優れた刃先の形状、すなわち切削した土砂の流れをスムーズにし、切削性、耐摩耗性を向上させる研究はほとんど実施されてこなかった。本研究では、3Dプリンタを用いて作成したビットを使用した模型実験及び3Dスキャナによる摩耗計測手法の開発を行うとともに、高耐久性ビットとして新たな形状を有する「スタミナビット」の開発に取り組んだ。模型実験では、カッタービットの切削の観察手法として良好な結果を得た。また、摩耗計測に関しては、3Dスキャナによってビット形状の詳細な把握ができる手法を確立した。

キーワード：カッタービット、長距離シールド、3Dスキャナ、3Dプリンタ

1. まえがき

近年、シールド工事は下水道や地下鉄のみならず、道路トンネルや農業水路への適用も増加傾向にあり、施工の大断面や長距離化が進み、様々な地質からなる地盤を効率的に掘削する技術が求められている^{1), 2)}。その中で、掘削性能を左右する超硬ビットの性能を向上させることも、課題の1つとして挙げられる。特に礫質地盤においては、ビットの損耗が顕著となることが分かっており、その対策が必要となる。

本研究では、高耐久性ビットを開発する目的で、ビットの透明模型を用いた模擬地盤での切削実験および試作モデルの実現場への適用を行った。

以下に、開発の経緯、切削実験での検証結果、実施工における計測等について報告する。

2. 高耐久性ビットの開発

2.1 開発の背景

一般的に、礫質地盤のシールド掘削においては、先行ビットであるシェルビットが大きな役割を果たすことが知られている。シェルビットで地盤を先行切削し、ティースビットで切削・取り込みをすることが求められるが、礫質地盤における長距離掘進では、先行ビットの耐摩耗性の向上が課題である。

シールド分野において、カッタービットの開発は、①材質の研究、②形状の研究、③長寿命化等の切削機構

(メカニズム、システム)の研究、④ビット交換等の施工方法の研究、に区分される。その中で、長距離シールドへの対応としては、主にビット交換手法の開発に取り組まれており、例えばリレービット工法など地盤改良を施工せず機内でビット交換を行う方法が実用化されている。これらの技術は、主に大口径シールドが対象となり、中小口径シールドにおいては現在のところ有効な手段がなく、また機内スペースも狭隘であることから開発は困難であるため、ビットそのものの長寿命化・高耐久化が求められる。

2.2 使用材料の選定

A. 超硬チップ

通常シールド機のカッタービットのチップ材としては、JIS規格(JIS M 3916)の鉱山工具超硬焼結合金が一般的に使用され、耐衝撃性に優れるE5種が用いられる(表-1)。また砂地盤等の長距離掘進では、耐摩耗性に優れるE3種が用いられることもある³⁾。母材(シャンク)部分はS50C(機械構造用炭素鋼)が用いられるケースが多い。

シェルビットは耐衝撃性を有するE5種をチップに用いて、さらに比較的軟らかいシャンク部で挟み込むことで、衝撃を吸収し、礫地盤において切削性を向上させていると考えられている。

表-1 カッタービット刃先材料の分類

JIS分類 番号	特性値		化学成分(参考)		
	硬度(HRA)	抗折力 kgf/mm ² (N/mm ²)	W (%)	Co (%)	C (%)
E 1	90 以上	120(1177)以上	87~90	4~8	5~6
E 2	89 以上	140(1373)以上	85~89	5~10	5~6
E 3	88 以上	160(1569)以上	83~87	7~12	5~6
E 4	87 以上	170(1667)以上	82~86	8~13	5~6
E 5	86 以上	200(1961)以上	78~85	9~17	5~6

(注) W: タングステン、Co: コバルト、C: カーボン

*東北支店土木第2部 **東日本支社土木技術部 ***東日本支社土木第1部

b. 材質の選定

超鋼チップのメーカーでは、化学成分の調整により、JIS規格に準じつつ独自の材質性能を保証しているものもある。その中で、筆者らは SG30 という材質に着目し、メーカーと協力して今回の開発におけるシェルビットに採用している。材質の性能を表-2に示す。SG30 種は、通常使用する E5 種の 2 ランク上の硬度(E3 種と同等)と 1.5 倍の抗折力を持つ材質で、これまで当社のシールド工事において 2 件の実績を有している。

耐摩耗性が以前のビットより高いことに加えて折損しにくいいため、材質面からは耐久性のあるビットの製作が可能である。なお SG30 は、超合金チップメーカー、株式会社スターロイ社の製品である。

表-2 各種チップ材の材質性能比較表

合金種別	JIS E5 種	JIS E3 種	SG30 種
硬度 (HRA)	86.0 以上	88.0 以上	88 (E3 種と同等)
抗折力 (N/mm ²)	1961 以上	1569 以上	2940 (E5 種の 1.5 倍)
特徴	通常のビットに用いられる合金	E5 種より硬度があるので硬質地盤に適用されるがチップが欠け易くコストも高い	E3 種の硬度を持ちながら折れにくく、コストも E3 種と同等

2.3 ビット形状の決定

a. シェルビットにおける課題点

シェルビットは礫層において先行して地山を切り崩す役割を果たすため、より切削性に富む形状としている。超合金素材を使用したチップ材を、比較的軟らかい母材(シャンク部)で挟み込むことで、衝撃を吸収し礫地盤において抗折性能を向上させている。

先行ビットの形状の中でも、シェルビットは大豊建設が初めて採用したビットで、長年の実績からチップが欠けにくく、また摩耗しにくい形状を選択している。すなわち、チップとシャンクの幅方向の断面比率がほぼ 1:1、また端面は切削した土砂をチャンバー内にスムーズに取り込めるような、いわゆる流線型に近い形状を持つ。

一方で礫地盤と砂地盤が互層となっているような地盤や、砂地盤の掘削延長が長い場合などは、砂質分の研磨作用によりシャンク部が先行して摩耗し、歯槽膿漏のようにチップが欠け落ちる事例もある。シェルビットの摩耗状況(写真-1)を見ても、シャンク部が先行して摩耗しており、シャンク部の摩耗対策が複合地盤においては課題となる。

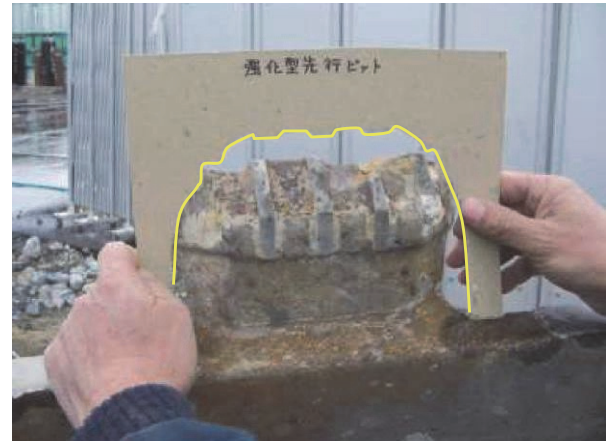


写真-1 シェルビットの摩耗状況

b. 摩耗対策

シャンク部分の摩耗を低減するために以下の方針でビット形状を決定し(図-1、2)、高耐久性の新たなカッタービットとして「スタミナビット」と命名した。

- i. 薄いチップ材を製作することで、チップの配置間隔を狭くして、より多くのチップを埋め込む
- ii. シャンク部分に円柱状のチップをさらに埋め込む

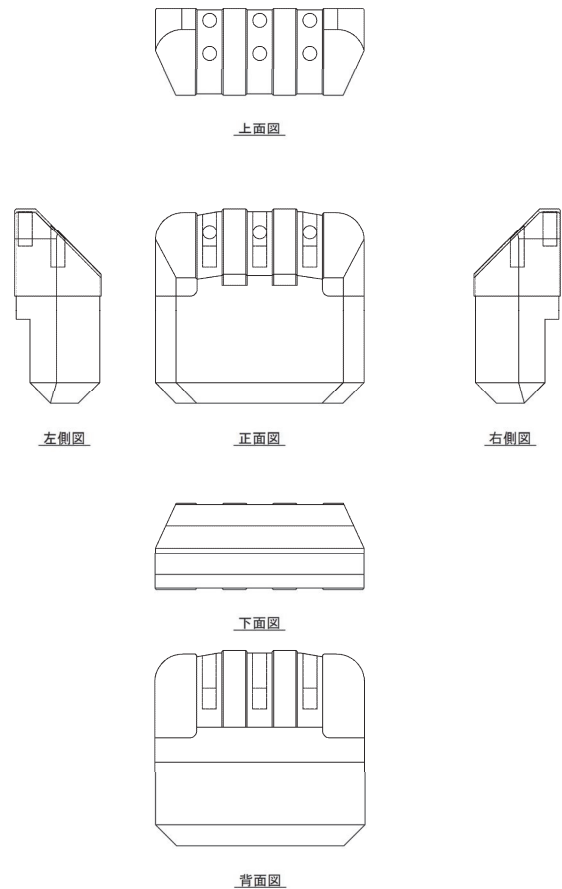


図-1 スタミナビットの形状

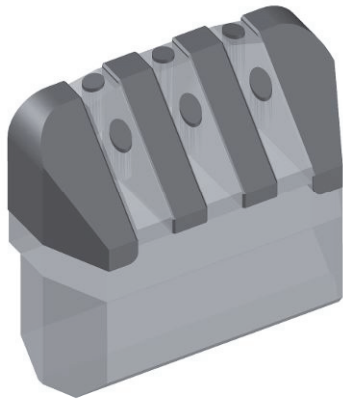


図-2 スタミナビットの形状 (3D)

素材は透明樹脂を使用し、2/3 サイズの模型を製作した。製作時間は模型の高さに比例し、3DCAD の製図に 2 時間、出力に 11 時間要した。製作した模型を写真-2 に示す。

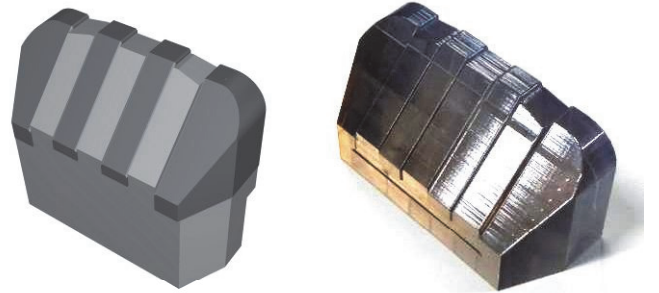


図-3 シェルビット形状 写真-2 製作した模型

3. 3Dプリンタによる模型実験

3.1 模型実験の背景

カッタービットの研究はこれまで、材質の研究、チップの配置や長寿命化等の切削機構の研究やビット交換等の機械的機構の研究などが主体で、ビットの形状については、各メーカーのノウハウや経験、実績に頼っており、具体的な研究があまりなされていない。その理由として、ビットの刃先と地山の接触面を直接確認する方法がなく、定量的に評価することが困難であったことが挙げられる。

今回開発を行った「スタミナビット」は、従来のシェルビットの形状を踏襲しつつ、円柱チップをシャンク部分に埋め込むという新しい形状としている。この円形チップの効果を確認する目的において、そもそもビットが地盤を切削する際の形状の効果について検証を行う必要があると考えた。

そこで、正確に形状を複製することが可能な 3D プリンタを用いて、「スタミナビット」の透明模型を製作し、模擬地盤で切削実験を行い、形状の効果について確認を行った。実験を行った結果、透明模型を用いることで、刃先と地盤の接触状況を観察することができ、また模擬地盤の切削状況を観察することで、切削性能を評価できることを確認した。

3.2 カッタービット透明模型の製作

本研究において 3D プリンタで製作するカッタービットの模型は、切削した土砂の影響を受けやすいシェルビットとした。使用した 3D プリンタの仕様を表-3 に、シェルビットの形状を図-3 に示す。

表-3 3Dプリンタ仕様

プリンタ	Stratasys 社製Objet30 Pro
形式	ポリジェット方式
造形サイズ	294(W)×192.7(D)×148(H) [mm]
造形解像度	600(X)×600(Y)×600/900(Z) [dpi]
鉛直解像度	8μm(標準)/16μm(高解像度)
精度	0.1mm

3.3 模擬地盤による切削箇所の確認

模擬地盤は、透明模型との接触面の視認性を検証するために、人工砂、球状プラスチックビーズ、砂礫土の 3 ケース用意した。写真-3～5 は模擬地盤に透明模型を設置した時の状況である。材料の彩度の違いから視認しやすさに違いがあるものの、十分な光源下では透明模型を介して地盤との接触面を視認できることを確認した。

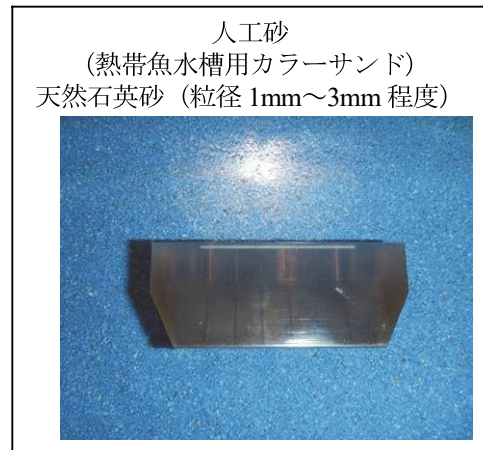


写真-3 透明模型設置状況 (人工砂)



写真-4 透明模型設置状況 (ビーズ)

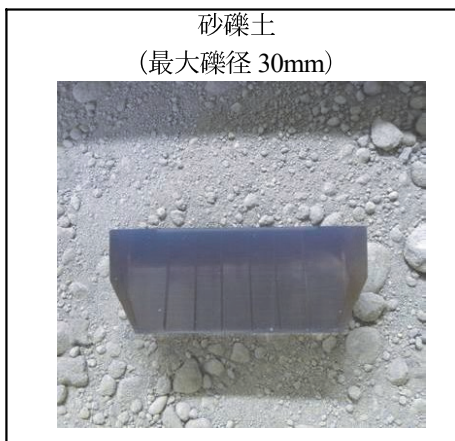


写真-5 透明模型設置状況 (砂礫土)

3.4 模擬地盤による切削状況の確認

切削状況の確認方法として、青色の人工砂上に2cm間隔で色彩の違う人工砂でマーカ線を設置した模擬地盤を作成し、ビットの透明模型を一方方向に切削しながら移動させた(写真-6)。移動距離は0から8cmまでとし、10cm/分程度の移動速度とした。また、試験中は継続的なマーカの移動を把握するため、試験装置上方からビデオカメラとデジタルカメラで撮影を行った。

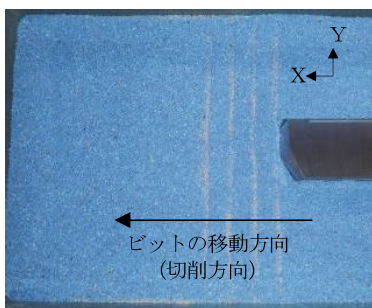


写真-6 透明模型による切削状況

マーカの移動量を示したものを図-4に、平均移動量を示したものを図-5に示す。マーカの移動量は、撮影した映像を画像解析することで定量化している。カッタービット刃先周辺の人工砂は、接触面で押し出されることによるビット進行方向への移動と、押し分けられることによる左右への移動が確認された。また、マーカの移動量から確認すると、切削方向に移動するもの主体となった。左右に移動する人工砂においても、カッタービットのテーパ面(写真下方、透明部分を介して確認できる箇所)より、垂直面(写真上方)の方が移動量が多かった。移動した人工砂は、前面の人工砂に流れを阻害され盛り上がるような運動をする。この盛り上がった人工砂が、実地盤においてカッタービットで切削された残土と考え、人工砂の運動量の大小がカッタービットの切削性能を示すと考えられる。

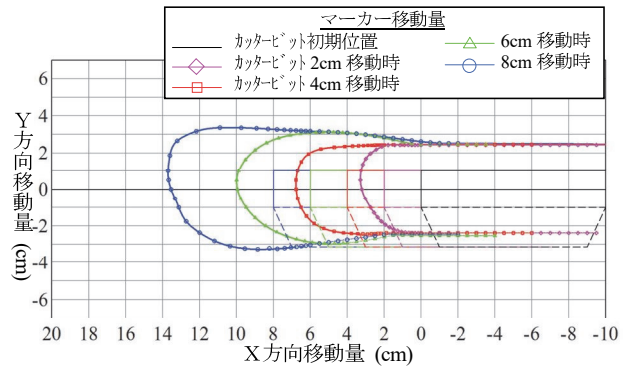


図-4 カッタービット位置別のマーカ移動量

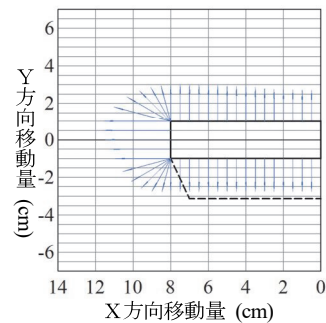


図-5 平均移動量

3.5 模型実験結果のまとめ

模型実験の結果、以下の知見を得た。

- i. 透明模型は、カッタービットの刃先と地山接触面を直接観察することができ、ビットの切削による土砂の移動方向は切削方向に移動するものが主体的となることを確認した
- ii. カッタービットのテーパ面より、垂直面の方が人工砂の移動量が多くなった
- iii. 移動した人工砂は、前面の人工砂に流れを阻害され盛り上がるような運動をすることが確認された。これらは、3Dプリンタで製作した透明模型による観察の成果であり、切削性能の評価につながる結果である。

4. 3Dスキャナによる摩耗計測手法の開発

4.1 開発の背景

シールド工事におけるカッタービットの長寿命化の開発では、実施工におけるカッタービットの摩耗量の計測が不可欠である。また、計測された摩耗量は、カッタービットの研究において基礎的資料となるため、高耐久性カッタービットの開発においても重要な役割を果たすと考えている。

一般的には、シールドの掘進完了後にカッタービットの摩耗量を測定して、計画時に推定した計画摩耗量と比較および考察をし、使用したカッタービットの性能を評価しており、通常は解体したカッタービットを取り外し、

施工前の形状に切り抜いた型紙にあてがいスケールで摩耗量を測定している（写真－7～8）。この方法では、摩耗量をカッターヘッドの先端で2次元的に把握することしかできないため、カッタービット側部の摩耗、チップの欠け、チップ周辺の摩耗状況を定量的に評価できない。



写真－7 ビット摩耗量測定



写真－8 側部の摩耗・チップの欠け

そこで今回、カッタービットの摩耗量を3次元的に把握するために、3D スキャナを用いて計測する方法を、実際のシールド機で試験した。以降にその方法を示す。

4.2 3Dスキャナによるカッタービット計測試験

4.1 で述べた課題を解決するために、3D スキャナを用いてカッタービットを計測する方法が有効であると考えた。3D スキャナは、対象物にレーザー等を照射し、点群データとして対象物の形状の三次元座標を取得するものである。今回、3D スキャナを用いて実際にカッタービット計測試験を行い、以下の事項を確認した。

- i. 3D スキャナでカッタービットの3次元データを取得できるか
- ii. 測定精度はどの程度得られるか

試験に使用した3D スキャナ（写真－9）には非接触ハンディタイプのものを使用した。対象物を15回/秒ごとに測定することで、対象物にマーカ等を設置することなく連続的に形状をスキャンすることができる。3D スキャナの仕様を表－4に示す。

計測試験は写真－10に示すように、シールド機製作工場で行った。計測した結果を画像で確認しながら測定し、さらに画像の合成等の操作を行った。作業時間は、1つのカッタービットで約30分から45分であった。

表－4 3Dスキャナ仕様

3Dスキャナ	OPTECH 社製 Artec EVA	データの取得時間	最大2,000,000 点/秒
3D解像度	最大0.5mm	出力フォーマット	OBJ、STL 等
3D距離精度	最大100cm以上	電源	12V
光源	フラッシュバルブ (非レーザー)	質量	0.85kg
測定距離	0.4～1m	寸法	261.5×158.2× 63.7mm



写真－9 3Dスキャナ

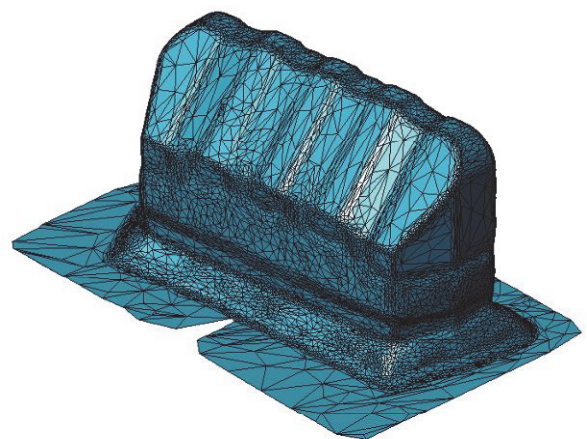


写真－10 計測試験状況

4.3 計測結果

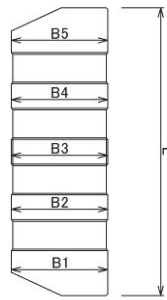
計測した画像の例を図－6に示す。点群データとして取得したデータを、CAD 上で確認できるよう3D メッシュ要素に変換している。

表－5は、カッタービットの幅方向を3D スキャナとノギスで計測した結果の差分を示したものである。全6点の計測データの差異の最大値は0.74mmで、標準偏差は0.27mmであった。両者の結果はほとんど一致しており、3D スキャナで計測することが実用上問題ないことが確認できた。



図－6 計測結果 (3D図面)

測点名	実測	3D	差
L	200.75	200.96	0.21
B1	62.50	63.01	0.51
B2	62.20	62.87	0.67
B3	62.30	63.04	0.74
B4	62.20	62.26	0.06
B5	62.10	62.20	0.10



表一五 計測結果（ノギス計測と3Dの比較）

5. 得られた知見

高耐久性ビットの開発に向けた本研究の取り組みにおいて、以下の知見を得た。

- i. 3D プリンタを用いることで、短時間で切削ビットの試作品（模型）の製作が可能である
- ii. 模型による切削性能実験では、カッタービットの刃先と地山接触面を直接観察することができ、ビットの切削による土砂の移動方向は切削方向に移動するものが主体的となることを確認した
- iii. カッタービットのテーパ面より、垂直面の方が掘削対象地盤（実験では人工砂）の移動量が多くなり、移動した人工砂は、前面の人工砂に流れを阻害され盛り上がるような運動をすることが確認された
- iv. 3D プリンタで製作した透明模型による観察により、切削性能の評価ができる
- v. 3D スキャナを用いることで、今まで出来なかった実際のシールド機に取り付けた切削ビットの3次元的な摩耗計測ができるようになった

6. あとがき

3D プリンタと 3D スキャナを用いることで、今まで出来なかったビットの試作品の製作と3次元的な摩耗計測ができるようになった。現在、①犬山系シールド（写真一11）、②仙台シールド、③京都新川シールド、④豊橋シールド（写真一12）の4現場で実稼働中のシールドマシンに高耐久性カッタービット「スタミナビット」を装着し、実際のシールド機の先端で地盤の切削実験を行っている。



写真一11 スタミナビットの装着状況（犬山系）



写真一12 スタミナビットの装着状況（豊橋）

各現場ではシールド機の到達やビット交換が予定されていることから、使用した高耐久性ビットを取り出し、効果の検証を行う予定である。その上で、対象となった地盤を含めた切削条件と摩耗状況を整理して分析し、「スタミナビット」の性能評価を行う計画である。

【参考文献】

- 1) 外木場康将、中村誠喜、宇留間高広、榊原光義、「シールド切羽可視化システムの構築と実現場への適用（その1）」、第69回土木学会年次学術講演会、pp.1275-1276、2014.9
- 2) 松田敦夫、木下茂樹、外木場康将、榊原光義、「シールド切羽可視化システムの構築と実現場への適用（その2）」、第69回土木学会年次学術講演会、pp.1277-1278、2014.9
- 3) 田中一雄、大道武治、深海仁司、山本 享、坪内範和、脇田雅之、小倉嵩敬、「超長距離・高速掘進シールドにおけるビット摩耗特性について」、第56回土木学会年次学術講演会、p.140、2001.9