

負のすくい角を持つビットによる コンクリート切削実験結果

CONCRETE CUTTING EXPERIMENT RESULT OF BITS HAVING NEGATIVE RAKE ANGLES

近藤紀夫*・富沢 勉**・小林隆治*・本間毅一*・金井和彦*
Norio KONDO, Tutomu TOMISAWA, Ryuji KOBAYASHI, Kiichi HONMA and Kazuhiko KANAI

Recently, deeper and longer shield tunnels are constructed. For construction of those tunnels, the method to cut concrete walls and bores them has been developed and the technologies to replace the bits and heighten the durability of those bits have been improved.

For those method and technologies, we performed cutting performance experiment of cross roof bits of the DPLEX shield having negative rake angles used to cut high strength concrete walls and normal concrete walls. As the result, we confirmed that those bits had the similar cutting performance as the conventional bits.

Key Words : DPLEX shield, parallel link, cutter bit, high strength concrete, cross roof bit

1. はじめに

近年、都市部の地下空間の高度利用が急速に進んでおり、都市の道路下にはすでに様々な地下構造物が築造されているため、新しいトンネルはこれらの既設構造物を避けて建設されることが多くなっている。さらには地下開発の活発化に伴って、建設副産物として発生する残土の処分が社会問題になっており、残土排出量の抑制が必要になっている。このような背景から使用目的に合った、様々な断面のトンネルを築造できるシールド工法の開発が急務となっていた。

これらの要請に応え、円形断面のみではなく矩形、馬てい形および楕円形など様々な断面のトンネルが築造できる合理的で経済的なシールド工法として偏心多軸 (DPLEX) シールド工法を開発、実用化した。

この掘削機は、従来の単軸シールドとは異なった切削運動を行うため、負のすくい角を持った全方向切削型カッタービット (クロスルーフビット) を採用している。

このほど、下水道管渠築造工事において円形の偏心多軸 (DPLEX) シールド (写真-1 参照) が採用され、この到達部で高強度コンクリートの仮壁切削工

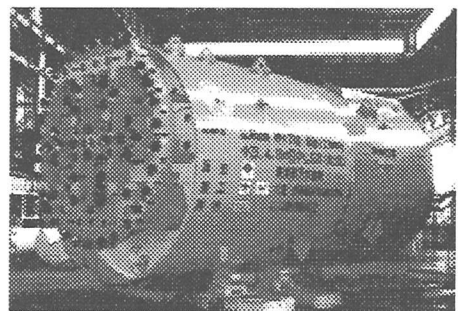


写真-1 円形 DPLEX シールド

* 正会員 大豊建設(株) 技術本部 技術開発部

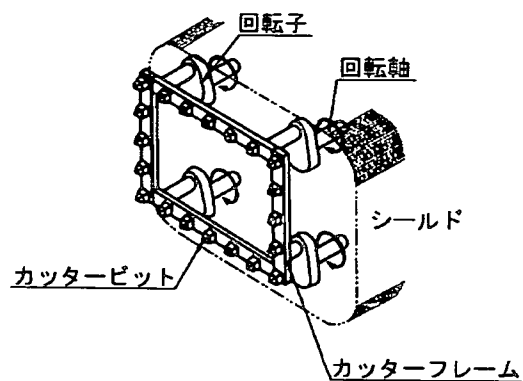
** 大豊建設(株) 技術本部 技術開発部

法（NOMST）が予定されている。これまで、負のすくい角を持ったカッタービットによる、高強度コンクリート壁の切削性能は実証されておらず、クロスルーフビットによるコンクリート壁の切削性能、耐摩耗性の実験を行い、実機との検証を行った結果を報告するものである。

2. 偏心多軸シールドの掘削機構

偏心多軸シールドのカッターは、図－1のようにカッターフレームを回転軸先端に偏心させて支持し、回転軸を同一方向に回転させるとカッターフレームが平行リンク運動を行い、カッター形状とほぼ相似形の断面を掘削することができる。

偏心多軸シールドは、カッター回転半径が小さいことから、カッタートルクが小さく、摺動距離も短くなるのでビットの摩耗量も少なくなる。また、個々のカッタービットに作用する切削力とビットの摺動距離は、すべて同じとなるため効率が良く、取り付け位置によるビットの摩耗量は変わらないといった特長がある。



図－1 偏心多軸シールドの掘削機構

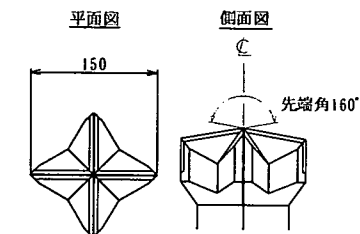
3. コンクリート切削実験

実験は、実工事に使用したものと同形状のクロスルーフビットにより、4種類の強度のコンクリートを切削し、切削時のトルク・推力・速度・回転数・ビットの摩耗量等を計測するとともに切削状況や切削ズリの形状を観察することで、偏心多軸シールドの切削性能および硬質地山への適応性を確認した。

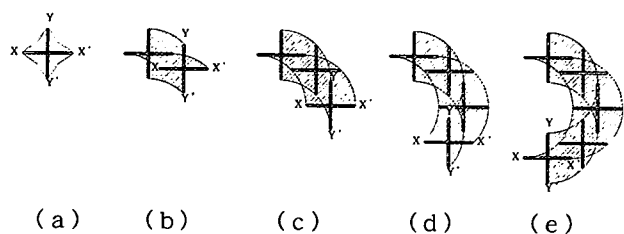
3. 1 クロスルーフビット

偏心多軸シールドでは、平行リンク運動に対応するために、全方向切削が可能なクロスルーフビットを使用している。クロスルーフビットは、図－2のように超硬チップをビットの頂部に十文字に埋め込んだ形状で、図－3に示す切削軌跡を描いて切削を行う。各軌跡はそれぞれ(a)の0度から時計回りに(b)45度、(c)90度、(d)135度、(e)180度の位置を示す。

また、超硬チップはE 5種とした。



図－2 クロスルーフビット形状図



図－3 切削軌跡図

3. 2 コンクリート供試体

コンクリート切削実験には、設計基準強度 9 N/mm^2 (Cace 1)、 24 N/mm^2 (Cace 2)、 40 N/mm^2 (Cace 3)、 80 N/mm^2 (Cace 4) とそれぞれ強度の異なる4種類の供試体を使用した。

表－1にコンクリート供試体強度結果一覧を示す。

3. 3 実験装置

切削実験は、D P L E Xシールド工法の開発実験に使用した実験機によって行った。実験機の主仕様を表-2に示す。

また、実験装置の構成は、図-4に示すように架台上に実験機をセットし、後方に推進ジャッキ、前方に供試体をそれぞれ固定したものとし、推進ジャッキによって実験機を前方に押しつけながら、実験機の前面に取り付けたクロスループビットによって供試体の切削を行った。

表-2 実験機主仕様

名 称	仕 様
カッタートルク	1.336 tf・m
カッター回転数	0 ~ 12 rpm
カッター回転半径	150 mm
カッター支持軸	4 軸

表-1 供試体強度結果一覧

供試体種類	設計基準強度 N/mm ²	圧縮強度 N/mm ²	細骨材	粗骨材	水セメント比 W/C %	セメント量 kg/m ³
Case 1	9	11.9	陸砂	天然軽量	65	269
Case 2	24	28.7	陸砂	普通碎石	52	313
Case 3	40	44.1	陸砂	石灰碎石	40	378
Case 4	80	89.2	陸砂	石灰碎石	25	640

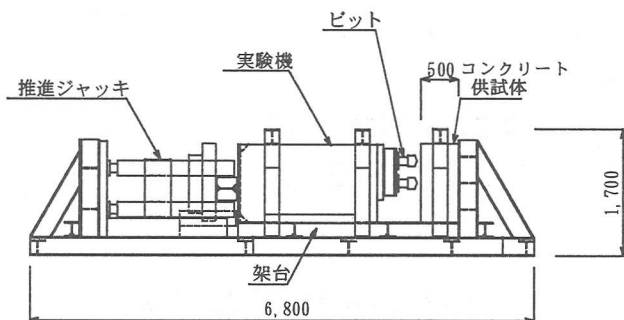


図-4 実験装置

3. 4 実験概要

コンクリート切削実験は、表-1に示した供試体（厚さ 50cm）切削時のカッター回転数および推進速度を変える事により、カッタービットの切込量を変化させ、その時のカッタートルクおよび推力を計測した。

1回の実験では、供試体の表裏両面をそれぞれ20cmづつ切削し、ビットの摩耗量の計測も併せて行った。

また、1本のカッタービットによる切削の他、複ビットによる切削実験を行い、ビット軌跡のラップ効果を確認した。複ビット時のビット間隔は30cmとし、2本ビットおよび4本ビットで切削を行った。図-5に各ケースの軌跡図を示す。

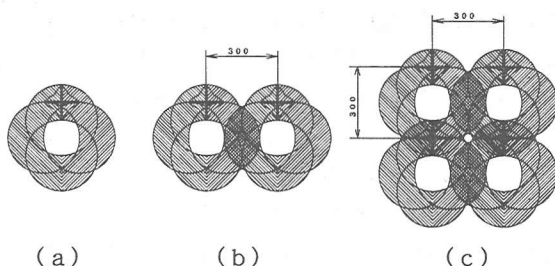


図-5 軌跡図

3. 5 実験結果

(1) 切削性能

図-6は、供試体 Case 1・単ビット切削時のトルクストローク関係図であり、平均カッタートルクは0.3 tf・mであった。

同様に、図-7~9にそれぞれ、供試体 Case 2, Case 3, Case 4の単ビット切削時トルクストローク関係を、図-10に供試体 Case 4の単ビット切削時推力ストローク関係を示す。また、表-3に平均カッタートルク、平均ジャッキ推力、推進速度およびビット1本当たりの切削力、推力を示す。

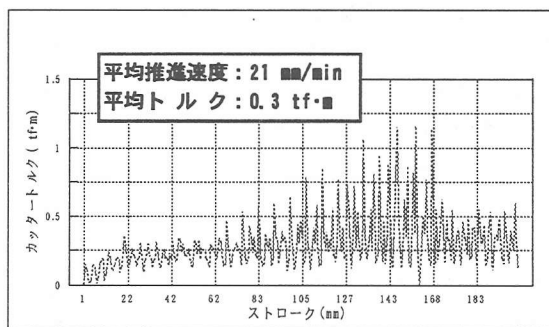


図-6 トルクストローク関係 (Case 1)

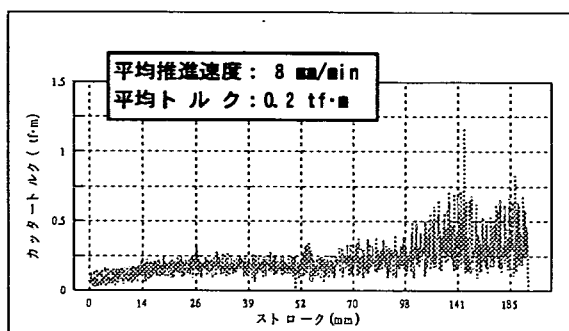


図-7 トルクーストローク関係 (Case 2)

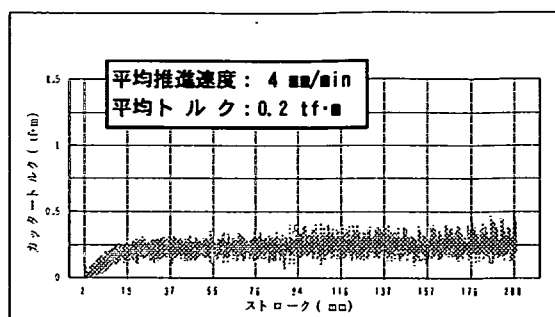


図-8 トルクーストローク関係 (Case 3)

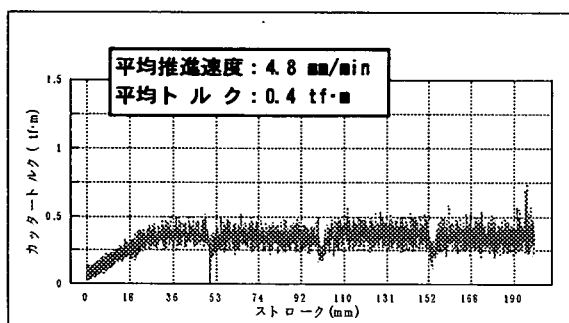


図-9 トルクーストローク関係 (Case 4)

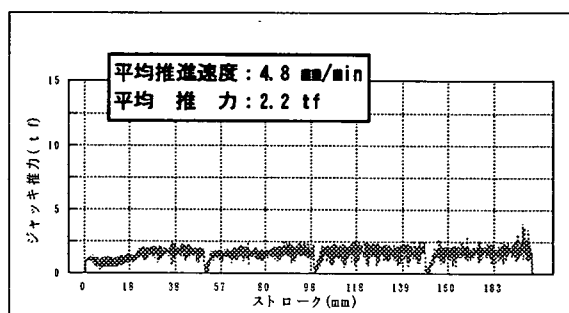


図-10 推力ーストローク関係 (Case 4)

Case 4 の供試体 (設計基準強度 80N/mm^2) は、NOMST 壁を想定したもので、切削時の平均カッタートルクは $0.4\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、単位幅切削力は 18 tf/m であった。また、ジャッキ推力は 2.2 tf で、単位幅推力は 15 tf/m であった。

Case 1 の供試体 (設計基準強度 9N/mm^2) は、土丹を想定したもので、切削時の平均カッタートルクは $0.3\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、単位幅切削力は 13 tf/m であった。

また、トルク値に変動が生じているのは、ビットの側面抵抗、切削ずりによる排土抵抗、および供試体とビット面での接触抵抗と考えられる。

以上のことから、負のすくい角を有するクロスルーフビットが、高強度コンクリート壁 (Case 4) に対して平均推進速度 4 mm/min 以上で、また、土丹相当強度のコンクリート壁 (Case 1) に対して、平均推進速度 20 mm/min 以上で切削でき、従来から使用しているティースビットおよびルーフビットと同様、十分な切削性能を確認できた。

(2) 複ビットによる低減効果

図-11 および 12 は、供試体 Case 4・複ビット切削時 (2本ビットおよび4本ビット) のトルクーストローク関係である。計測の結果、2本ビット時の平均カッタートルクは $0.5\text{ tf}\cdot\text{m}$ 、4本ビット時で $0.6\text{ tf}\cdot\text{m}$ であり、ビット1本当たりのコンクリート壁切削力は、それぞれ 1.8 tf 、 1.0 tf (表-4 参照) と単ビット時

表-3 単ビット切削性能結果一覧

供試体 種類	ビット 本数	カッター トルク ($\text{tf}\cdot\text{m}$)	ジャッキ 推力 (tf)	推進 速度 (mm/min)	1本当たり 切削力 (tf/本)	1本当たり 推力 (tf/本)
Case 1	1	0.3	0.9	21	2.1	0.9
Case 2	1	0.2	0.3	8.0	1.3	0.3
Case 3	1	0.2	0.5	4.0	1.7	0.5
Case 4	1	0.4	2.2	4.8	2.6	2.2

の切削力 2.6 tf より小さく、ビット軌跡のラップによる低減効果が確認できた。

表-4 に複ビット切削時の切削性能結果の一覧を示す。

表-4 複ビット切削性能結果一覧

供試体 種類	ビッ ト 本数	カッタ ー ト ル ク (tf・m)	ジャッキ 推 力 (tf)	推進 速 度 (mm/min)	1 本 当 切 削 力 (tf/本)	1 本 当 推 力 (tf/本)
Case 4	2	0.5	3.5	2.8	1.8	1.7
Case 4	4	0.6	5.3	2.1	1.0	1.3

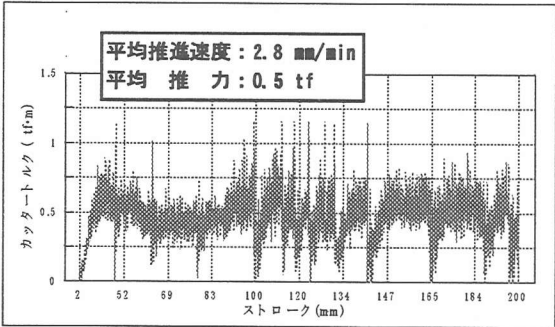


図- 11 トルクーストローク関係（2本ビット）

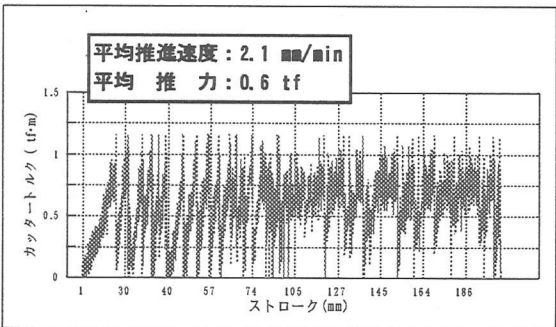


図- 12 トルクーストローク関係（4本ビット）

(3) 切削状況

写真-2 に、4 本ビットにおけるコンクリート供試体切削状況を示す。コンクリート供試体は、Case 4 の高強度コンクリート（設計基準強度80N/mm²）で、推進速度を 4.8mm/min、カッター回転数 6 rpm で切削を行った。

また、写真-3，4，5 に推進速度を変化させた場合のコンクリート切削片の状況を示す。推進速度は、左から順にそれぞれ 4 mm/min，8 mm/min，12mm/min 程度であった。

この状況から、推進速度が小さいと切削片が小さく砕いたような粉状となり、推進速度を大きくすると、厚みと幅の大きな裂断形となることがわかった。



写真-2 ビット切削状況

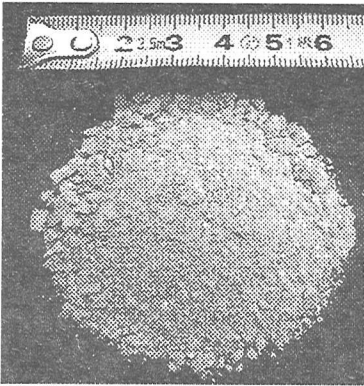


写真-3

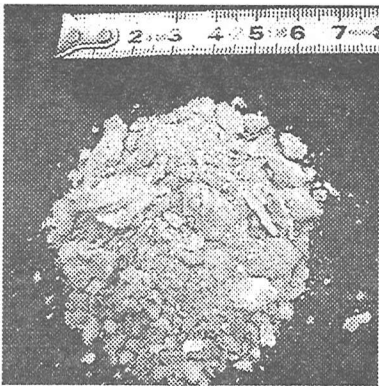


写真-4

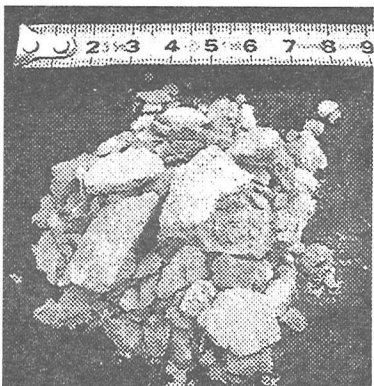


写真-5

(4) ビット摩耗

図-13にビット摩耗量と摺動距離の関係図を示す。80N/mm²の石灰石コンクリートについては、初期摩耗量が大きく、摺動距離が1,700m（コンクリート壁40cm切削）までは摩耗係数が0.35mm/km、その後3,000m（40～80cm切削）までの区間では0.1mm/kmであった。クロスルーフビットによる高強度コンクリート壁切削時の摩耗係数は、全区間の平均でも0.24mm/km程度であり、一般的なティースビットの実験での摩耗係数（0.1～0.3mm/km）と同等であることが確認できた。

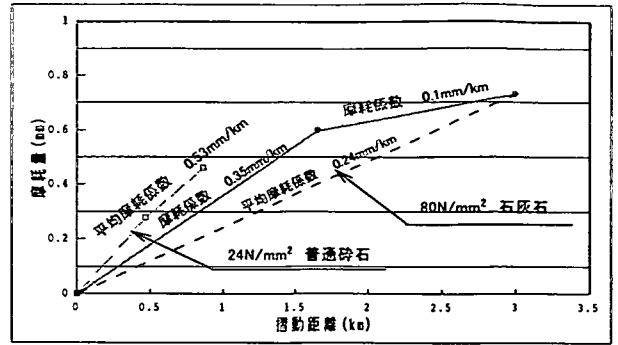


図-13 摩耗量-摺動距離関係

また、普通碎石コンクリート切削時の摩耗係数は、0.53mm/kmであった。

(5) 実機との対比

実験の結果から、DPLEXシールド実機による高強度コンクリート壁切削時の所要トルクと推力を算出し、切削能力を検証する。

シールド外径φ3.5mのDPLEXシールドを想定した場合、カッター回転半径 $r = 250\text{mm}$ 、推進速度 1mm/min で高強度コンクリート壁を切削するために必要なトルク・推力は、4本ビットによる実験値を考慮して、切削面積比率で算出すると、所要トルク $T' = \text{約} 21\text{tf}\cdot\text{m}$ 、所要推力 $F' = \text{約} 160\text{tf}$ となる。これは、DPLEXシールドの標準的な装備トルク $T = 26\text{tf}\cdot\text{m}$ ($\alpha = 0.6$)、装備推力 $F = 1200\text{tf}$ (120tf/m^2)と比べても、十分に余裕のある値である。

4. まとめ

負のすくい角を持つカッタービットは、従来の切削理論から、切削性能に課題があるという認識が一般的である。しかし、当社では負のすくい角を持つルーフビットやクロスルーフビットを用いた多くの実績から、通常の地山に対しては十分な切削性能を確認しており、さらに、本実験において、クロスルーフビットによる高強度コンクリートの切削性能を確認した。

また、コンクリート壁切削時のビット単位幅当たり切削力とビットの摩耗係数は、従来の単軸型シールドに用いられているティースビットと同等であった。この結果、カッターの回転半径が小さいという特長をもつDPLEXシールド工法では、切削トルクおよびビットの摩耗を小さくできることがわかった。

今後は、この特長を生かして、長距離掘進、高速・省エネ掘進および中硬岩地山の掘削を可能にすべく研究開発を進める所存である。

5. 参考文献

- 1) 小林隆治他：多軸（DPLEX）シールドの高強度コンクリート切削性能実験（その1）、土木学会第52回年次学術講演会講演概要集Ⅲ-B 92、B 95、pp184-185、190-191
- 2) 富沢勉他：偏心多軸（DPLEX）シールド工法の開発、北陸地方建設技術報告会・建設技術報告会 in 北陸'97 報文集、pp35-40