

大断面の長距離掘進に適したシールド構想

A NEW SHIELD SUITABLE FOR LARGE-SECTION LONG-DISTANCE TUNNELING

石井昌次¹⁾・金子研一²⁾・杉山雅彦³⁾

Ma satsugu ISHII, Kenichi KANEKO and Ma sahi ko SUGIYAMA

The length of shield tunneling has been on the increase in recent years, and long-distance tunneling with a large-section shield exceeding 10 m in diameter is likely to increase in the near future. Taking advantage of the fact that a large cross section is involved, the authors have developed an eccentric multi-axis shield tunneling machine that has six fan-shaped cutters. Each cutter has its own drive system and is capable of being retracted into a housing that has the same shape as the cutterhead located in the shield.

This paper reports on a three-dimensional flow analysis of slurry in the chamber and shows that use of segmental cutters improves flow.

Key Words: shield, multi-axis shield, long-distance, flow analysis

1. はじめに

近年、シールド技術の進歩と「コスト縮減」といった社会的な要望からシールドトンネルは長距離化の傾向にある。さらに、現在調査・審議中の大深度地下利用に関する法案が成立すると、シールドの掘進はさらに深くなり、この傾向は加速するであろう。

すでに電力洞道において、直径5.75 mのシールドで掘進する距離が6 kmを越える工事が実施されている。下水道の分野でも直径が9.45 mのシールドが4 kmを超える工事を掘進中であり、今後、鉄道や道路トンネルのように直径が10 mを超える断面のトンネルでも4 kmを超える長距離の工事が実施されるであろう。

ところが直径が10 mを超える大断面シールドになると直径が5～6 mのトンネルとは異なる問題点がクローズアップされる。例えば、カッタが1回転する間に最外周のビットの摺動する距離は中間部の2倍になり、ビットの摩耗の進行が著しく異なるようになる。また、カッタを駆動させる装置も大きくなり、製造上のコストアップ等を招く。逆に、大断面であることを有効に活用すると、カッタを分割したり、部分的な作業が可能になるなど、中小断面のシールドでは実施できない合理的な作業方法が見いだせる。

本論文で直径が10 mを超える大断面で長距離掘進に適した新しいシールドの構想とその優位性を従来のシールドと比較した結果について述べる。

2. 複数のカッタ回転軸を有するシールド

-
- 1) フェロー会員 大成建設(株)千葉支店 土木部
 - 2) 正会員 博士(工学) 大成建設(株)東京支店 土木技術部
 - 3) 三菱重工業(株)神戸造船所 建設機械部

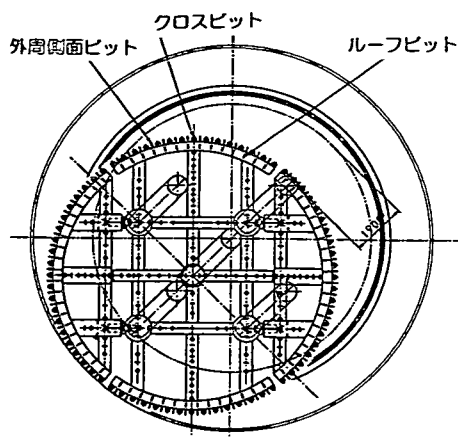


図-1 偏心多軸型シールドのカッタ

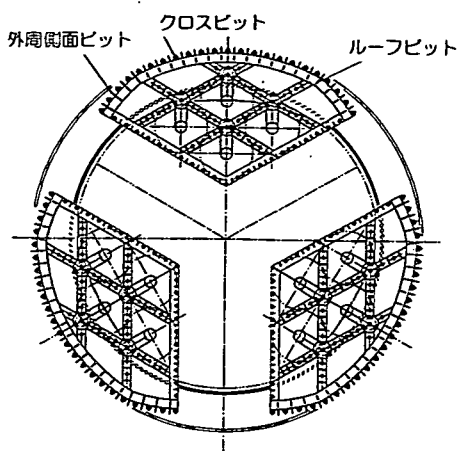


図-2 偏心多軸型シールドの3分割カッタ

円板カッタの装備トルクはカッタの直径の3乗に比例する。このため、シールドが大断面になると非常に大きな駆動装置が必要になる。同一の断面面積であっても大断面を1枚の大きな円板カッタで掘削するより、複数の小さな円板カッタを組合わせて掘削した方が全体としては駆動装置が小さくて済み、マシンの価格も安くなる場合がある。

シールドの断面は円形が一般的であるが、鉄道の分野を中心に二つの円形を重ね合わせた断面や三つの円形を重ね合わせた断面の実績が増加している。二つの円形を重ね合わせた断面を掘削する方法の一つに2基のカッタスポークを歯車のようにかみ合せながら回転させる泥土圧式のシールドがある。このシールドは、お互いのカッタを反対方向に回転させるため、本体を回転させようとする力を打ち消し合い、ローリングが発生しにくい。三つの円形を重ね合わせた断面は地下鉄道の駅部を施工するシールドに採用されている。中央のカッタを前方に突き出し、左右の背面に円板カッタを配置した形状はバランスが良く、泥水式のシールドで多用されている。このように、複数の円板カッタを組み合わせることで、大きな断面を掘削することが可能になるが、円形の断面形状の掘削に適応させると掘削できない部分が生じてしまう。

円形断面を掘削する方法の一つに、クランク機構を応用した偏心多軸型のシールド(DPLEXと呼ばれる)がある(図-1)。掘削断面より小さな面積の円板カッタを複数の偏心した軸で回転させることにより、全断面を掘削するもので、カッタの駆動装置が小型化するため、コスト面で有利と言われている。また、全てのビットの摺動距離が等しく、かつ、従来のシールドと比較してビットの摺動距離が短いため長距離の掘削には有利である(文献1)。

しかし、カッタヘッドの面積がトンネル全体の面積より小さいため、掘進停止時にビットで切羽を抑える効果が小さく、また、カッタの位置が偏るため、切羽全体を均等に抑えることができない欠点がある。通常のシールドは掘進に伴い、程度の差はあるが、カッタの回転方向とは逆方向にローリングしていく。一般的には、カッタの回転方向を逆にすることで修正が可能だが問題にはならないが、地盤が硬くなるほど、また、掘進速度が速くなりビットの切削深さが深くなるほど、この傾向は顕著になる。さらに、偏心多軸型のシールドの場合、硬い地盤で、シールドの直径が大きくなると、カッタヘッドの揺動回転に伴い、シールド本体が大きく揺動する可能性がある。

これらの問題を解決するためにカッタを分割して掘進するシールドを着想した。図-2に示すように、カッタヘッドを3分割にして、それぞれのカッタヘッドをそれぞれの駆動装置で、お互いの動きを打ち消し合うようにカッタを回転すると安定した掘進が行える。また、掘進停止時もカッタヘッドをバランス良く均等に配置できるため、切羽を抑える効果があがる。

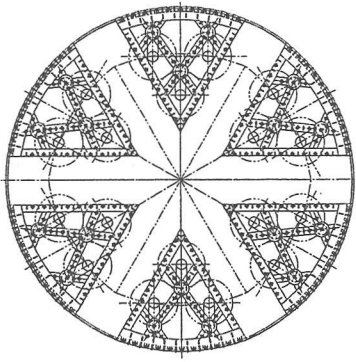


図-3 偏心多軸型シールド
の6分割カッタ

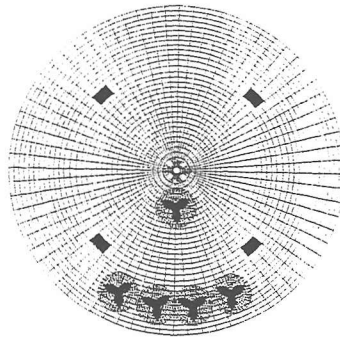


図-4 ケース1チャンバ内
メッシュ分割図

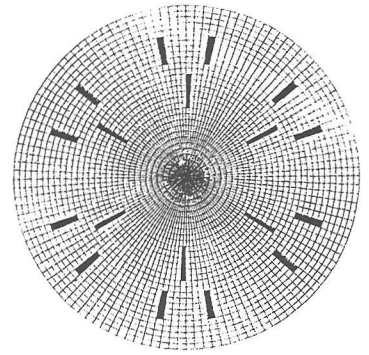


図-5 ケース2, ケース3
チャンバ内メッシュ分割図

3. 新しいシールドと従来型シールドの比較

(1) 泥水の流動解析

偏心多軸型シールドのカッタを分割する効果を確認するためにチャンバ内に満たされた泥水の三次元流動解析を境界適合格子を用いた差分法で行なった(文献2)。シールド直径を約14mとし、シールドのカッタは図-3に示すような6等分割とした。6分割にすることで掘進停止時にカッタを広く分布でき山留め効果が上がるだけでなくカッタの動きを細かく制御することでローリングを防止する効果が大きくなると想定した。検討した3ケースの条件を表-1に示す。

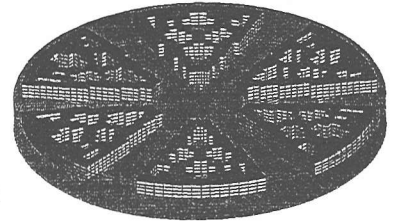


図-6 6分割カッタ形状

表-1

項 目	ケース1	ケース2	ケース3
カッタ	従来の円形カッタ	6分割の偏心多軸型	6分割の偏心多軸型
カッタ回転方向	1方向	すべて同一方向	交互に逆回転
アジテータ	有	無	無
送泥および排泥	考慮しない		

ケース1のチャンバ内をメッシュに分割したものを図-4に、ケース2および3のチャンバ内をメッシュを分割したものを図-5に示す。さらに、チャンバの深さ方向を10cmごとに12分割している。どちらのケースも分割数は約40000である。図-4に示すY字の黒塗部はアジテータ、図-5の黒塗部はカッタの支持アームをイメージしている。また、図-6は6分割カッタの三次元モデルである。円形カッタ、アジテータ、分割カッタの表面および内部のグリッドに式-1の速度を与え、定常解析を行った。ケース1の円板カッタの回転数を0.63rpm、ケース2, 3の分割カッタの回転速度を1.8rpm、アジテータの回転速度を4.8rpmとした。

$$V_x = -(Y - Y_0) \omega \quad V_y = (X - X_0) \omega \quad (\text{式-1})$$

ここに、 ω ：回転角速度 (radian/sec) X_0, Y_0 ：回転中心の座標 X, Y ：グリッドの座標 である。

泥水または泥土を非圧縮性の粘性流体 (ビンガム流体) と仮定すると、流れを支配する方程式は次のようになる。

運動方程式；

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nabla((\nu + \nu_e) \nabla \mathbf{v}) \quad (\text{式-2})$$

連続の式；

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \mathbf{v}) \rho + \rho \nabla \cdot \mathbf{v} = 0 \quad (\text{式-3})$$

ここに、 $\mathbf{v}$ ：速度ベクトル， p ：圧力， ρ ：平均密度（1200kg/m³）， ν ：粘性係数， ν_e ：渦粘性係数
粘度は次式により求める．

$$\mu = \tau / \dot{\gamma} + \eta \quad (\text{式-4})$$

ここに、 μ ：泥水粘度 [Pa・sec]， τ ：降伏応力 [Pa]， $\dot{\gamma}$ ：せん断速度 [1/sec]，
 η ：降伏後のみかけの粘性 [Pa・sec] であり， $\tau=7.2$ ， $\eta=0.02$ とした．

なお渦粘性係数 ν_e は標準的な等方性 K- ϵ 2 方程式モデルを解いて求めたシールド掘進によるシールドのチャンバ内の泥水流動の変動は，シールドの掘進速度が毎分 cm と緩やかなため考慮しない．

(2) 解析結果

最大流速，平均粘度および平均せん断速度を表-2に示す．せん断速度 $\dot{\gamma}$ が0.01以下の場合，粘度 μ はすべて720になるように上限値を設定した．

表-2

	最大流速 (m/sec)	最大粘度 (Pa・sec)	平均粘度 (Pa・sec)	平均せん断速度 (1/sec)
ケース1	3.124	720	67.1	1.25
ケース2	0.229	720	41.5	0.46
ケース3	0.228	720	41.9	0.42

流動性の指標として平均粘度を比較するとケース2および3が低流動性が良好であることがわかる．

ケース1は5基のアジテータのために最大流速，平均せん断速度が高く算出されているが，図-7の流速ベクトル図（タイトルの $z=0.1$ とは隔壁より10cm切羽側を意味する）に示すように，アジテータの無いチャンバ室上部はきわめて流動性が悪い．ケース2およびケース3はチャンバ全域で，おおむね同程度の流動性が得られている．ケース2とケース3の流速ベクトル図（ $z=0.3$ ）をそれぞれ図-8および図-9に示す．ケース2およびケース3の解析結果として $z=0.3$ を選んだのは $z=0.1$ より傾向が分かりやすいためである．ケース2ではX字状に下方から中心に向かい上方へ向かう流れが際立っている．ケース3では中心から外側へ上下方向に向かう流れ外周から中心に向かう流れがバランス良く分布していることがわかる．
図中，流速の小さい部分は白く見え，粘度が高くなるが，ケース2と3では有為な差はみられない．

ケース1の粘度分布（ $z=0.1$ ）を図-10に，ケース2およびケース3の粘度分布（ $z=0.1$ ）を図-11，図-12に示す．両者を比較すると粘度が50Pa・secを超える高粘度の部分の面積は類似しているが，ケース2およびケース3は全体に分布しているのに対し，ケース1は局所に片寄っている．このことから，ケース2およびケース3の方がケース1と比較して泥水の流動性の良いことがわかる．これらの結果は，単に泥水の流動性をチェックしただけでなく，カッタが回転あるいは揺動することにより，シールド本体がローリングあるいは揺動するといった影響を受けにくいことも示唆している．

4. ビット交換技術への応用

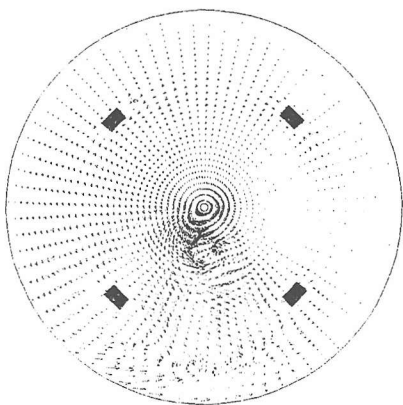


図-7 ケース1の流速ベクトル図 ($z=0.1$)



図-10 ケース1の粘度分布図 ($z=0.1$)

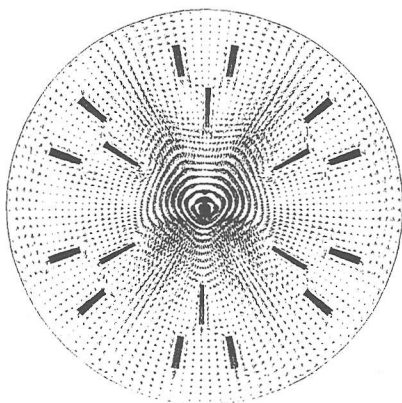


図-8 ケース2の流速ベクトル図 ($z=0.3$)



図-11 ケース2の粘度分布図 ($z=0.1$)

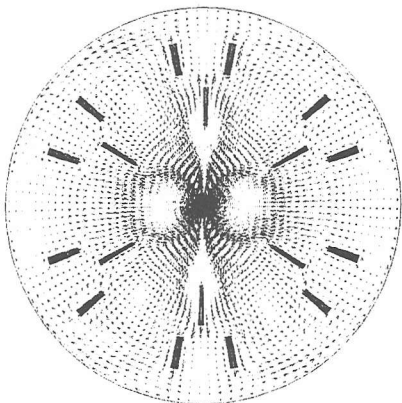


図-9 ケース3の流速ベクトル図 ($z=0.3$)

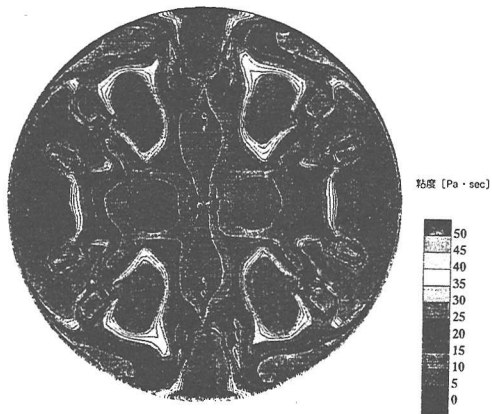


図-12 ケース3の粘度分布図 ($z=0.1$)

シールドが長距離を掘進する場合の課題として、ビット、テールシール、カッタシール等の耐久性があげられるが、特にビットの耐久性の向上が解決すべき大命題である。

ビットの耐久性を向上させる対策として、摩耗しにくいビットを使用すること、あるいはビットの交換が容易な機構を装備することがあげられる。前者については、①チップの材質にE3種を使用する、②ビットの背面に超硬材を埋め込むことでビット全体の耐力をあげる、③ビットの配置に段差を付けることで許容される摩耗量を増加する、等の方法がとられている。

また、摩耗したビットを地下で交換する技術が必要である。すでに、いくつかの技術が提案されているが実用化されているものは少ない第1節で述べた6 kmを超える電力洞道工事ではそれまで掘削に關与しなかった新しいビットが背後より突出する構造になっている。この技術の欠点として、1回しか利用できないため、施工条件や地盤条件、掘進距離により制限されることである。

下水道工事では球体シールド工法が採用されている。シールドが内蔵した球体を利用して、カッタヘッドを坑内に向けビットを交換する施工法である。複数回の交換が可能である。しかし、掘削断面が大きな球体シールドの場合、球体の加工に大型の設備が要求され、既存の装置で対応できなくなる場合がある。伸縮型のスポークカッタ、カッタの引き込み装置、球体の回転装置等の大型化により、コストが高くなり、球体の回転作業や段取りにかかる日数も増加する。また、球体全体を回転する作業時の切羽地山の保持も困難になる。

カッタに関しては、この球体シールドに偏心多軸型シールドの3分割カッタを組合わせることで、ビットの摩耗量を減らし、ビットの交換回数を減らすことが可能である(図-2)。ビットの交換時は、3分割されたカッタヘッドを中心部に集めて停止し、カッタヘッドを球体の内部に引き込み、球体を回転して坑内からビットを交換する(図-13)。

この方法はカッタスポークを伸縮させる従来型の球体シールドの機構と比較して、カッタを伸縮させるための特別な機構が不要なことから構造面で単純化できる。また、偏心多軸型シールドは1枚のカッタを駆動する方式と比較して、装備するモータを少なくでき、トルク的にも優れている。大断面のカッタ全体のビット交換を同時に行うのではなく、部分的に作業することで装置全体のコストダウンと作業の効率化が図れる。掘削方式は泥水式シールドで、カッタ構造は多軸偏心型、カッタ形状は扇形に6等分割したものをを用いる。それぞれのカッタは分割されていて、独立して駆動する。カッタは、カッタヘッドと同形状のユニットに収納されており、そのユニットより若干大きな筒体内を、スライドジャッキを用いて後退することができる構造になっている。筒体の左右の壁には、それぞれ半分の山留め板が壁とヒンジに格納され、油圧ジャッキで観音開きに開閉する。

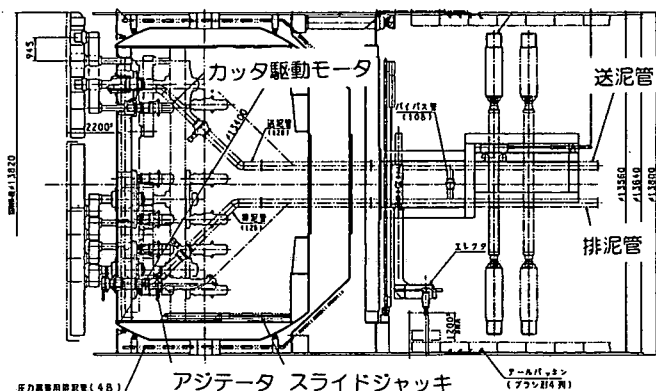
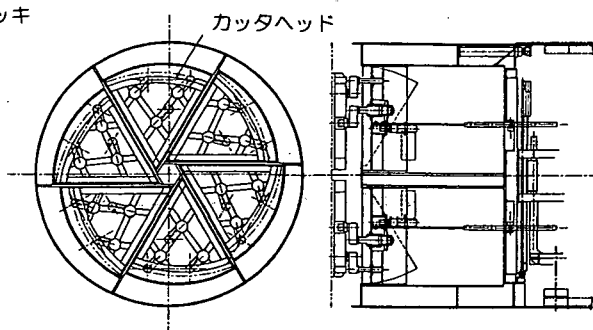
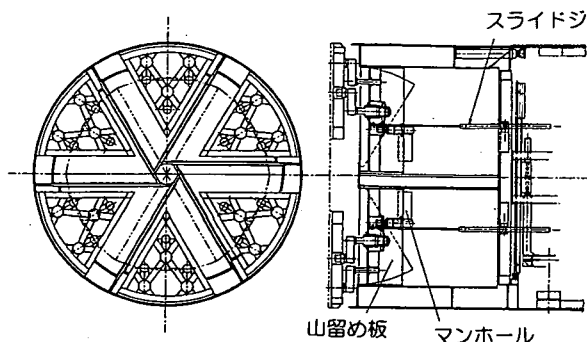


図-13 3分割カッタの球体シールド

① 掘進完了（交換作業開始）

② カッタ所定位置停止



③ カッタ引き込み

④ ビットの交換

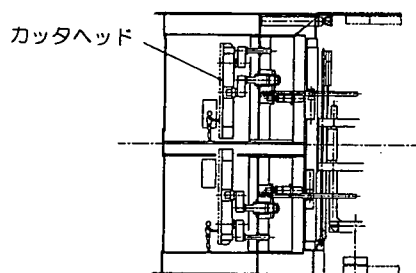
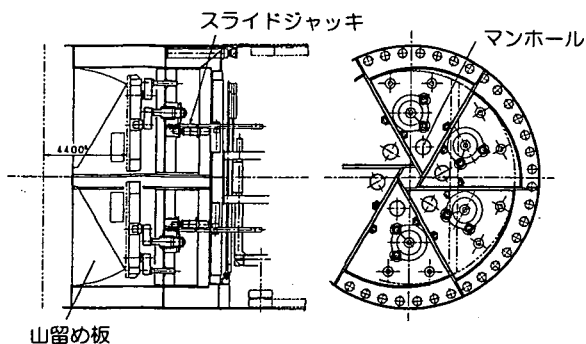


図-14 ビット交換の手順図

ビットの交換の手順を図-14に示す。①掘進が終了後のカッタヘッドの状況を示す。②カッタヘッドを回転し、分割したカッタを中央に集めた状態で停止する。③分割された個々のカッタ全体をシールドの内部に引き込む。④壁に格納していた山留め板を閉じる。チャンバとの隔壁部で山留め板どうし、山留め板と筒体がシールされる。筒体の内部に閉じ込められた水を抜いた後、作業員が隣接ブロックの窓から作業室の内部に入る。作業員は目で点検しながら損傷したビットを選択して交換する。

ビットの交換作業が終了後、逆の手順で掘進を再開する。作業室内に水を注入した後、山留め板を開き、カッタを押し出す。これら一連の作業は、隣接ブロックからの作業員の出入りを考慮して、すべてのブロックを一斉に引き込むことをせず、2～3ブロックづつの作業とする。球体シールド工法と異なり、ビットの交換中も、部分的ではあるが、カッタで切羽を抑えることができる。

5. 再利用型シールドへの応用

応用技術として再利用型のシールドを提案する。大断面のシールドを掘進後、同一の大断面のシールドに再利用するのではなく、数台の小断面シールドとして転用する構想である。小断面の方が需要が多いため、転用する効果は大きい。

通常、シールドが立坑に到達すると、再利用できる部品は撤去され、その他多くの部材は切断してスクラップ処分されている。当初から再利用を前提に設計しておくことができれば、小断面シールドへの転

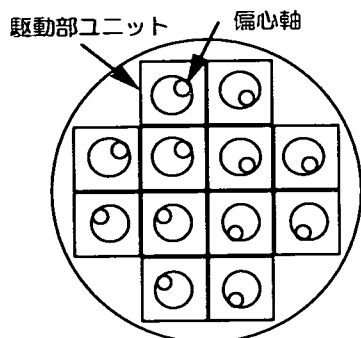


図-15 大断面シールドのカッタ駆動部

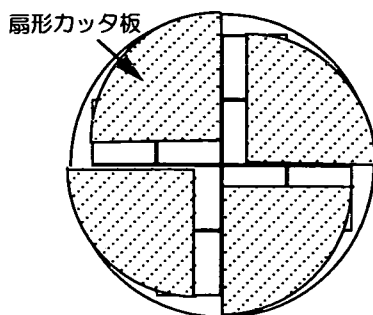


図-16 大断面シールドのカッタヘッド

用が容易に実現できる部材は立坑から搬出できるサイズにユニット化しておきボルトを外すだけで簡単に解体できる構造にする。ユニットとは、部品でなく機能の集合体であり外観は同一の形状をしているイメージである鋼殻部分は覆工体と考え、到達立坑に残置する。

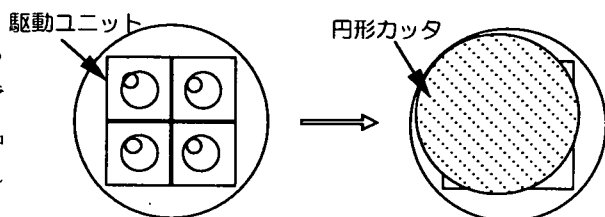


図-17 中断面円形シールドに再利用

偏心多軸型シールドはこの構想に適している。

例えば図-15に示すように正方形の断面を有した12基の駆動部ユニットを組合わせて大断面の円形トンネルで使用する。図-16に示すように、円形のカッタヘッドを十字に4分割し、1枚の扇型カッタ板は3基のユニットで駆動する。図-17に示すように、掘進完了後、4基の駆動ユニットを利用して中断面の円形シールドに再利用することができる。カッタヘッドは新たに製造した円形形状である。このように、カッタヘッドと鋼殻はトンネルの断面に応じて新しい製品を使用するが、駆動部をはじめとするコストの大きな部分はユニット化したブロックを重ねることで再利用が促進できる。

6. おわりに

偏心多軸型シールドは、カッタを分割することで大断面でも有効に適応でき、また、合理的なビット交換が可能になることを示した。胴体を分割し、尺とり型とすることでセグメントの組み立てと掘進の同時施工が可能になるなど、さらに応用範囲が広がるであろう。以上述べたことは、シールドとしては実施のための設計が可能なものばかりである。

筆者らは、シールドトンネルをいかに経済的に掘削するかをテーマに研究している。今回の研究は、大断面の長距離掘削に関し、従来型シールドの問題点を解決しており、実現されることを願う次第である。

参考文献

- 1) 加島豊・ほか; 平行リンク掘削機構による矩形断面シールド掘進実験, トンネル工学研究発表会論文・報告集第2巻, pp107-112, 1992.10
- 2) 檜崎邦男・ほか; シールドチャンバ内の泥土・泥水の流動解析, トンネルと地下, pp35-39, 1994.8