小丸川水力発電所用斜坑リーミング TBM の開発 *

寺 田 紳 一¹ 大 久 保 誠 介² 福 井 勝 則³

Development of an Inclined Shaft Reaming Machine for Omarugawa Hydroelectric Power Plant

by Shinichi TERADA^a, Seisuke OKUBO^b and Katsunori FUKUI^{b*}

a. Osaka Plant Production Division, Komatsu Ltd., 3-1-1 Ueno, Hirakata, Osaka 573-1011, Japan

b. Department of Systems Innovation, School of Engineering, The University of Tokyo, 7-3-1 Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-8656, Japan

(*Corresponding author, E-mail: fukui@sys.t.u-tokyo.ac.jp)

Tunnel boring machine is one of the accepted methods for infrastructural projects for tunnel ventilation or surge shaft in hydroelectric power projects. It is also a widely used technology in the installation of production and ventilation shafts and ore passes for mines. For large diameter inclined shaft boring, there are two solutions: Full-face blind shaft boring machine (FM) and Shaft reaming machine (RM). In the latter case the excavated muck falls through the pilot hole to a lower level. The pilot hole of a small diameter can be also excavated with a raise-boring machine. Through the careful and comprehensive discussion, a RM was found to be appropriate for our target project (Omarugawa hydroelectric power project). In the development process, very valuable data taken in former Kazunogawa hydroelectric power project were carefully examined and necessary modifications were done to a new machine for Omarugawa. Special care was taken in designing the cutterhead to optimize the shape for best cutting efficiency and muck removal performance.

1. Open type cutterhead for lightweight machine and easy access to machine parts and tunnel wall.
2. Cone-shape cutterhead for optimum disc cutter arrangement, good face stability and efficient muck removal.
3. Two vertical supports in pilot and reamed shafts for flexible direction control and excellent maneuverability.

Finally, it should be noted that the developed machine had successfully completed the inclined shaft without significant troubles.

KEY WORDS: Inclined Shaft, Reaming, TBM, Hydroelectric Power Plant, Omarugawa

1. は じ め に

比較的大断面の斜坑掘削は、導坑（パイロット坑）を下部より掘削し、上部より拡幅（リーミング）する二工程方式で行われることが多く、従来は両者とも発破で行われてきた。しかし、斜坑掘削は水平坑に比較し、危険度が高く、安全面、工期、コスト面からも機械施工が望まれてきた。このため、国内では1979年に電源開発（株）による福島県の下郷発電所（導坑3.3 m、拡幅坑5.8 m、延長約500 m、斜坑角度37°）において、導坑・拡幅掘削ともに海外製TBM（トンネル掘進機）を用いた施工が行われた。この施工では拡幅掘削時に導坑部での洗掘（出水により坑壁が侵食される）、導坑部との境界面での崩落、グリッパ部での坑壁の崩壊などの問題はあったものの、比較的良好な結果が得られたとの報告がなされている¹⁻⁶⁾。その後しばらくの間、機械施工による斜坑掘削はなかったが、1989年に東京電力（株）による栃木県の蛇

尾川揚水発電所（導坑2.3 m、延長462 m、斜坑角度52.5°）において、国産機の使用では初となる導坑の機械施工が行われた⁷⁾。ただし、この工事における拡幅は発破工法が採用された。1995年に東京電力（株）による山梨県の葛野川揚水発電所（導坑2.7 m、拡幅坑7.0 m、延長約970 m×2条、斜坑角度52.5°）において、導坑・拡幅坑ともに国産TBMを用いた斜坑掘削が実施された。この工事において導坑掘削時にはカッタの摩耗が激しかったり、ずり排出口のつまりが生じたりする問題が生じた。また、リーミングTBMを用いた拡幅掘削時には導坑および拡幅坑の天端やグリッパ部での坑壁の崩壊が生じたが、いずれも対策を施して、良好な結果を得たことが報告されている⁸⁾。本研究で主たる対象とする九州電力（株）による宮崎県の小丸川発電所（導坑2.7 m、拡幅坑6.1 m、延長約890 m、斜坑角度48°）でも、リーミングTBMを用いて同様な工法により施工が行われた^{9,10)}。

海外においては、ヨーロッパを中心に水圧管路の用途以外にもケーブルカー、鉱山、換気用として、TBMを用いた斜坑トンネルの掘削が50例以上行われており¹¹⁾、斜坑角度が45°を超えるものも見受けられるが、掘削径が5 mを超えた例はない。また、スイスにおける斜坑角度33°、掘削径4.77 mの斜坑トンネルにおいて、全周セグメント方式で掘削を行ったが、カッタヘッド駆動部が損傷して掘進不能となり、使用機械を変更し対応した例が報

*2011年7月25日受付 2012年2月14日受理

1. (株)小松製作所 生産本部大阪工場

2. 正会員 工博 東京大学教授 工学系研究科 システム創成学専攻

3. 正会員 工博 東京大学准教授 工学系研究科 システム創成学専攻

[著者連絡先] FAX: 03-5841-7035 (東大・システム創成)

E-mail: fukui@sys.t.u-tokyo.ac.jp

キーワード: 斜坑, リーミング, TBM, 発電所, 小丸川

Table 1 Projects with reaming machines in Japan.

Project	Pilot tunnel diameter (m)	Reaming diameter (m)	Slope (degree)	Country of manufacture
Shimogo power plant	3.3	5.8	37	Foreign
Shin-aimoto power plant	3.6	6.2	Horizontal	Foreign
Akiba #3 power plant	3.3	7.1	Horizontal	Foreign
Kazunogawa power plant	2.7	7.0	52.5	Domestic
Shin-itsukigawa power plant	3.0	4.3	Horizontal	Domestic
Omarugawa power plant	2.7	6.1	48	Domestic
Hachioji-joseki tunnel	4.97	12.94	Horizontal	Foreign

告されている^{12,13)}。この例からもわかるように、斜坑 TBM ではトンネル軸と傾斜した水平な作業台などが必要になる。トンネル軸方向に配置する機械類に加えて、傾斜した部分のスペースを確保することから、スペースの確保が難しく、その結果として機械各部の小型化が必要になる。ことに、通常の水平方向に掘削する TBM よりも駆動部の設計が格段に困難となり、市販の電動機が使えずに新規に開発した例もある¹⁴⁾。しかしながら、その仕様の決定のプロセスや設計方法についてはほとんど公表されていない。

本稿で取り上げるパイロット／リーミング TBM 工法は、最終仕上がり断面に対し、トンネル中心部に先ず小断面の導坑をパイロット TBM で掘削後、そのトンネルを仕上がり断面までリーミング TBM により拡張していく二工程の工法である。本工法の特徴は、一工程で最終仕上がり断面まで掘削を行う全断面 TBM 工法と比較して、コストや工期面では不利であるが、小径の導坑掘削時に地質を全線にわたって把握できること、また、拡張前に地山改良等を実施できることなどの利点がある。参考までに Table 1 にこれまでに国内で用いられたリーミング TBM をまとめておく。

本稿では、2011 年に全水車発電機が稼動する予定の小丸川発電所で用いられたリーミング TBM を中心に述べることにする。また、その際に、2001 年に全水車発電機が稼動した葛野川発電所で用いられたリーミング TBM を念頭において話を進めることにする。第 2 章では、両発電所の概要について述べるが、既に多くの報告¹⁵⁻¹⁷⁾がなされているので、記述は最低限にとどめた。第 3 章では、これまでにほとんど報告がなされていない、リーミング TBM の基本形式、掘削方式、カッターヘッドに関する検討の経緯について述べる。続く第 4 章では、主として葛野川発電所での実績を踏まえて細部の検討をおこなった結果、小丸川発電所で用いられたリーミング TBM ではどのような点を検討して改良したかを述べる。なお、斜坑 TBM に関する研究はほとんど公表されておらず、通常の水平坑用の TBM と比べてどのような点に配慮すればよいかさえ明瞭になっていない。本稿ではこの点についてある程度の見解を示すことをひとつの目的とした。

2. 葛野川発電所と小丸川発電所の概要

葛野川発電所⁸⁾は、山梨県甲州市を流れる富士川水系日川の支流に上部ダムを、大月市を流れる相模川水系土室川に下部ダムを建設し、この間の有効落差 714 m を利用して、単機出力 (40 万 kW) の発電機 4 台により、最大出力 160 万 kW の発電を行う大容量の純揚水式発電所である。建設工事は 1993 年に着工し、1999 年 12 月に 40 万 kW、2000 年 7 月に 40 万 kW、2001 年 7 月に残りの 80 万 kW の運転を開始した。この発電所の水圧鉄管は、上部斜坑と下部斜坑を持つ。上部斜坑は導坑掘進をレイズボーラ工法、拡張掘削を発破工法で施工した。本研究で対象とした下

部斜坑は、導坑掘進を斜坑切り上がり (斜め上向きに掘進) TBM で、拡張掘削をリーミング TBM で施工された。水圧管路が通過する付近は、山梨県東部の大菩薩嶺の東南に位置しており、中生代白亜紀後期から新生代古第三期に属する泥岩と砂岩の混合層からなっている。岩石は比較的強固で、一軸圧縮強度は 35 ~ 248 MPa の範囲で平均値は 105 MPa であった。へき開面や節理面に沿って剥離しやすい特徴を有していた。岩盤等級区分は、CH 級が 91%、CM 級が 8% で CL 級以下は 1% であった。

小丸川発電所¹⁵⁻¹⁷⁾は、宮崎県の中央部を東へ流れる小丸川の支流大瀬内谷川に上部ダムを、小丸川本流に下部ダムを建設し、この間を約 2.8 km の水路で連絡して、その有効落差 646 m より最大出力 120 万 kW (単機出力 30 万 kW が 4 台) の発電を行う。建設工事は 1999 年に着工し、2011 年に全ての発電機が稼動する予定である。本研究で対象としたこの発電所の上部斜坑は、導坑掘進を斜坑切り上がり TBM で、拡張掘削をリーミング TBM で施工された。水圧管路が通過する付近は、新生代古第三紀始新世 ~ 漸新世の四万十累層群の日向層群 (砂岩、頁岩) と、これに斜坑中央部で斜坑にほぼ直交する形で貫入している木城花崗閃緑岩の幅約 300 m の岩脈状岩体を基盤とする。この木城花崗閃緑岩は新第三紀中新世に活動した尾鈴火山山深成複合岩体の西側縁辺部に位置する衛星岩体である。花崗閃緑岩は岩級区分としては概ね CH 級であり、部分的に CM、CL 級が存在する。CH 級岩盤の基質は一軸圧縮強度 170 MPa 程度、節理間隔は 5 ~ 50 cm 程度であった。また坑壁弾性波速度は 5.0 ~ 5.4 km/s であった。岩盤中の不連続面としては、節理、鏡肌、小規模な破碎帯 (ほとんど 10 cm 以下) が観察された。

3. 斜坑リーミング TBM に関する基本的な検討

3・1 基本形式の選定

基本形式の決定は、対象とするプロジェクトの成否にかかわるもっとも重要な事項といえる。水平坑用の TBM は事例が多いので基本形式の決定手順はほぼ確立されているが、斜坑リーミング TBM についてはこのような基礎的な手順についても不明な点が残されている。小丸川の斜坑リーミング TBM の基本形式を選定する際には、次の 2 点を最初におこなった。

- ① 斜坑を切り上げるか、切り下がるか (掘進が斜め上向きか、下向きか) の選定
 - ② TBM の形式をオープン型とするか、シールド型とするかの選定
- 切り上がり掘削の場合、TBM には自重に抗する力に加えて、上部からの崩落に対する荷重についても考慮することが必要である。その結果、TBM の重量、寸法、所要動力が大きなものとなりがちである。一方、切り下がり掘削の場合は、両者を考慮する必要がないので、切り上がり掘削よりも小型で軽量の TBM でよい。しかしながら、切り下がり掘削ではずりの排土、突発湧水の

排水は切り上がり掘削より困難である。そこでこの2点について、既掘削済みの導坑を利用することにより行えるかどうかについて検討を行った。その結果、2点を克服できる見通しが立ったので、小丸川用の斜坑リーミング TBM においては、切り下がり掘削を選定することにした。

シールド型の TBM (本体を外殻 (スキンプレート) で覆い安全性を増したタイプ) では、不良地山への適応性が高いとされている。一方で、地山の変化の把握や、その対応が遅くなること、あるいは外殻での掘削抵抗の増加は避けられない。さらに外殻が坑壁にかみこみ易い欠点がある。オープン型の TBM は不良地山に対しては不向きである。しかしながら、斜坑切り下がり TBM においては、切羽が斜坑下側にあるので切羽崩壊の危険性は軽減されるし、さらに天盤崩落に際しても比較的安全に TBM 後部から岩片除去、支保、補助工法などの必要な処置をできることが多い。事前調査の結果、小丸川の地質・岩盤は比較的良好であり、部分的に軟弱な部分に遭遇した場合には TBM 後部からの補助工法で十分に対応できると考えて、オープン型の TBM を採用した。ただし、外殻がないため、岩盤崩落時に機械の損傷対策や保護、人への安全対策は十分考慮しておくことが必要となるので、設計の際に十分な配慮をすることにした。

以上で、斜坑リーミング TBM として、切り下がり掘削でオープン型の TBM を用いることを決定したので、次に掘削方法を検討する。

3・2 掘進方式の決定

オープン型の斜坑切り下がりリーミング TBM では、第一段階の調査から、まず以下で説明する3つの掘進方式を対象を絞り込んで検討をおこなった。各掘進方式の検討結果をまとめると次のようになる。

A 方式：既設導坑のノーズグリップで反力を取り拡幅掘削を行う方法

①導坑のノーズグリップに依存するところが大きいので、先に掘削された導坑が計画通りに掘削されていると、リーミング TBM による拡幅掘削は容易である。しかしながら、導坑が計画から逸れていると修正するには多大の手間を要する。

②推進機構がすべて導坑内にあるため、導坑の掘削径を大きくする必要がある。さらに、導坑内にある推進機構の保守・管理は困難なことが多い。

③メインビーム内を通行できるため、導坑内の観察、及び補助作業が可能である。この点は大きな利点といえる。

B 方式：拡幅坑のフロントサポート (ルーフ、サイド、バチカルサポートを合わせた総称) のグリップで反力を取り拡幅掘削を行う方法

①導坑が計画通り掘削されているかどうかには、ほとんど影響されない。反面で、掘進中に拡幅坑内から方向制御を実施することになるので一定の困難が伴う。

②導坑はずりの通過のみを考慮した大きさでよく、A 方式に比較し小径で良い。全ての推進機構が大きな拡幅断面にあるため、保守・管理は容易である。

③リーミング TBM の前部自重を拡幅坑内にあるバチカルサポートで支持する必要がある。見積もって見たところ、推進機構が全て拡幅坑内にあるのでバチカルサポートが負担する自重は大きい。さらに、バチカルサポートのシューは掘進にともなって移動するので、坑壁との間に大きな摩擦力が働く。当然ながら、この摩擦力分だけカッターヘッドに加えられる推力は減る。以上で述べた点は B 方式における欠点である。

C 方式：既設導坑と拡幅坑の両方で反力を取れる方式である。通

Type	Flat	Semi-Dome	Dome	Cone
Cutterhead shape
Disc cutter arrangement
Face stability (Shade indicates potential loosened zone)
Muck discharge (Shade indicates muck pile)

Fig.1 Comparison of four types of cutterhead.

常は、導坑内のノーズグリップと拡幅坑内のメイングリップを利用し掘削する。導坑に問題がある場合 (例えば坑壁の肌落ち) には、ノーズグリップを使用しないで B 方式と同じ方式で掘削する。①概略の設計をおこなって検討した結果、導坑内にはノーズグリップを設置することになるが、それ以外の装置は拡幅坑内にあるため、A 方式ほど大きな導坑断面の必要はない。

②A 方式と同様に、メインビーム内を通行できるため、導坑内の観察、及び補助作業が可能であるようにリーミング TBM を設計できる。

③通常は、掘進中も移動しないノーズグリップで、リーミング TBM の前部自重を支えるので B 方式の③の欠点はない。

小丸川の事前の調査結果を詳細に検討した。その結果、一部ではあるが軟弱な部分を通過することが判明した。この軟弱な部分の予測強度から推測すると、ノーズグリップの反力が確保できないと判断した。よって、導坑で反力を取り拡幅掘削を行う A 方式は採用しないことにした。

ついで B 方式の検討に移った。これまでよりも一歩進めた推進機構細部の検討もおこなったが、上記の①であげた方向制御を常に行いながら掘進することは相当な熟練が必要だし、場合によっては方向制御が困難であるために掘進速度を上げられない可能性がある。また、バチカルサポートに加わるリーミング TBM 前部自重もより正確に見積もって見たが、相当に大きく、結果として大きな摩擦力が発生してしまうことが判明した。

最後に C 方式について検討をしてみた。今一度、小丸川の事前の調査結果を検討した結果、軟弱な部分は一部であり、大部分はノーズグリップが使用できる状況にあることが判明した。そこで、C 方式に基づいたリーミング TBM の推進機構の細部について検討したところ、妥当なコストで製作できることが判明したので、最終的に C 方式を採用することに決定した。

3・3 カッターヘッドの形状の決定

カッターヘッドは面板の有無で、二分される。岩盤が強固で安定している場合には、面板がないスポーク型のカッターヘッドを採用できる。小丸川の事前の調査結果より、一部ではあるが軟弱な部分があるので、面板のあるカッターヘッドとすることにした。

Fig. 1 に示すように、フラット型はカッターヘッド面板全体が平らであるために製作し易い。しかしながら、斜坑壁を掘削するには外周部のディスクカッターを傾けて面板に取り付ける必要があり、取り付け部の強度やディスクカッターの耐久性で問題がある。

Fig.2 Cone type cutterhead inclined at θ degrees from horizontal.

また、切羽外縁は直角なので岩盤の崩落が生じ易い、この隅に掘削ずりがたまり易いことが検討の結果から判明した¹⁴⁾。また、リーミングTBMに固有のことであるが、切羽と導坑との交差部分の安定性についても検討した。その結果、このフラット型では、切羽と導坑壁とのなす角度が 90° であり、角の部分が崩落し易いことが判明した。Fig. 1の上から3段目の図では、崩落し易い部分をハッチングで示しておいた。

セミドーム型は、外周部を曲面形状とし、フラット型の外周と外縁部における欠点を補ったものである。フラット型では困難であった外周部でのディスクカッタの配置が容易にできる。フラット型で問題であった、外縁部での岩盤の崩落は応力解析の結果より相当に緩和されることがわかった。ずりの排出に関しても、直角な隅がなくなるので、フラット型よりはかなり改善される。また、設計は容易であり、製作も外周曲面を除けば比較的容易であることがわかった。しかしながら、切羽と導坑との交差部分の安定性に関する欠点は、フラット型と変わらない。

セミドーム型はカッタヘッド外周部を曲面状としたものであるがカッタヘッド内周はフラット型と同じであった。切羽全体を曲面状にすることで、内周部はもちろんのこと、切羽全体の安定性が向上する。そこで、面板全体が曲面形状であるドーム型を検討することにした。応力解析の結果、切羽と導坑との交差部分の安定性は増すことが判明した。しかしながら、フラット型やセミドーム型と比較して製作が困難で、コスト的に引き合わない恐れが高いことがわかった。

ドーム型の検討の中で、切羽と導坑との交差部分の角度が増せば、この部分の安定性が増すことがわかった。そこで、セミドーム型の内周部分に傾斜を持たせたコーン型を検討してみることにした。カッタの取り付け、外縁部の切羽の安定性はセミドーム型やドーム型と同様に良好といえる。さらに、コーン部分では掘削ずりの排出が、傾斜しているがゆえにこれまでにあげた3つの型のうちではもっとも良好と予測した。さらに、概略の設計をした後に、製作手順やコストを見積もって見たところ、ドーム型よりははるかに有利であることが判明した。

前述の通り、斜坑切り下がりリーミングTBMで用いるカッタ

ヘッド形状についてはコーン型が有望であることがわかった。しかしながら、コーン部分の角度をどれくらいにしたら良いかについてはわかっていなかったため、この点について検討を加えることにした。コーン部分の角度を決定するのに勘案した主たる要因は次の4点である。

- ①ずりの排出のし易さ
- ②切羽角部の安定性
- ③ディスクカッタの取り付け可能数
- ④カッタヘッドの強度とコスト

これまでの実績調査から、切羽下部にずりが滞留しないためにはコーン部分の傾斜角($90^\circ - \theta - \alpha$)が 20° 以内であることを条件とした。 θ は 48° なのでこれを代入すると条件は $\alpha > 22^\circ$ となる。

切羽角部の安定性について検討をした。切羽角部の崩壊を小さくするには、Fig. 2に示す $\gamma (=90^\circ + \alpha)$ を大きくする必要がある。従来の実績を調査したところ α を 15° とした従来機種で大塊の崩落があった。そこで少なくとも $\alpha > 15^\circ$ であることを条件とした。

ディスクカッタの取り付け個数は、岩盤破碎を適切に行うために面板に沿ったディスクカッタの間隔が一定になるよう配置することにした。カッタヘッド傾斜角度を 0° とした時のディスクカッタの取り付け数を N とすると、 α の時の取り付け個数は、 $N \times 1/\cos \alpha$ となる。つまり、 α が大きくなるに従い、ディスクカッタ装着個数は増加することによってイニシャルコストおよびランニングコストの増加となる。

α を変えて強度計算と粗いコストの見積もりをしてみた。 α が大きくなって、コーン部分が長くなると必要な強度が確保できない(強度を確保するには大幅なコスト増を招く)。強度とコストの両面を考慮して検討した結果では、妥当なコストの範囲内で十分に強度が確保できるのは $\alpha < 30^\circ$ となった。

①と②の観点からは 22° 以上の α が要求される。一方③の観点からは α は小さいほうがよい。④からは 30° 以下が α の条件となる。①から④の観点から検討した結果では、 α の範囲は $22 \sim 30^\circ$ となった。この α の設定は重要であるので、実機寸法の1/20の実験装置を製作しベンチテストを実施した。ベンチテストの結果は、机上の計算を裏付ける調和的なものであった。最終的には、コストは若干高くなるが、①と②の観点を重視して α を $22 \sim 30^\circ$ の範囲の上限の 30° に決めた。

4. 実績を勘案した細部の検討

見通しを良くするために、葛野川と小丸川で使用したTBMの仕様をTable 2に示す。以下では、Fig. 3に示す小丸川のリーミングTBMでは、どのような検討を経て各部を改良したかを述べる。

4・1 カッタヘッド

Fig. 4に小丸川のカッタヘッドを、リーミングTBMの前方から見たときの図を示す。葛野川のリーミングTBMでは直径432 mm (17インチ)のシングルディスクカッタを34個とした。掘進方向のカッタ荷重 P_d を計算する際には、ディスクカッタが掘進方向と面板傾斜角度 α だけ傾いていることを考慮する必要がある。色々な計算方法が考えられるが、もっとも単純に考えて、面板と直交方向のカッタ荷重 P_n 、見かけの摩擦係数 μ を用いて次式から計算することにした。

$$P_d = P_n (\cos \alpha + \mu \sin \alpha) \quad \dots\dots\dots (1)$$

右辺第2項の $P_n \mu \sin \alpha$ は、ディスクカッタが回転しながら掘進方向に進んでいくために発生する力である。仮に、軸受け容量から決まる P_n の最大値を220 kN、 α を 30° 、 μ を0.3として式(1)に代入すると P_d の最大値は約220 kNとなる。カッタヘッドに加

Table 2 Machine specifications used in Kazunogawa and Omarugawa.

Project	Kazunogawa power plant	Omarugawa power plant
Length (m)	11	12
Mass (kg)	360,000	313,000
Total power (kW)	1100	1100
Cutterhead power (kW)	960	900
Cutterhead motor (kW)	160 (six motors)	150 (six motors)
Cutterhead torque (kN·m)	2019	1921 (under 4.5 rpm) 1600 (over 4.5 rpm)
Cutterhead rotation (rpm)	2.7 - 4.5	2.7 - 5.4
Number of disc cutter	34 (432 mm single)	28 (432 mm single) 1 (305 mm twin)
Disc cutter material	Nickel chromium molybdenum steel	Nickel chromium molybdenum steel
Total thrust (kN)	8310	6664
Thrust jack (kN)	2078 (four jacks)	1666 (four jacks)
Jack stroke (m)	1.5 (per advance)	1.5 (per advance)
Main gripper (kN)	23,520	20,580
Shoe size (m×m)	4.1×1.7	3.6×1.7
Shoe contact pressure (MPa)	2.1	1.7
Nose gripper (kN)	2420×3	3920×2
Shoe diameter (m)	1×1 (square)	0.8 (circle)
Shoe contact pressure (MPa)	2.5	7.8

える推力は P_d の総和から計算できる。カッタヘッドを回転するのに必要なトルク T は、次式から求めることにした。

$$T = \sum_{i=1}^n f_r(i) P_d(i) r(i) \dots\dots\dots (2)$$

添字 i は、 i 番目のディスクカッタに関する値であることを示す。 n はカッタヘッドに取り付けられているディスクカッタの総数である。 $r(i)$ はディスクカッタの回転半径である。 $f_r(i)$ はみかけの摩擦係数で転動係数と呼ばれることがある。この $f_r(i)$ の中には、ディスクカッタの転がり抵抗、面板とずりとの摩擦抵抗、面板外周部での摩擦抵抗等が含まれており、切込み深さや岩盤の特性により変化する。検討の末に直径 432 mm のシングルディスクカッタの場合には、転動係数を約 0.11 として必要なトルク（電動機出力）を計算した。なお、これは比較的強度の高い岩盤を掘削したときの値である。やわらかい岩盤を掘削したときの転動係数は 0.11 より大きくなることがわかったが、カッタ荷重 P_d が小さいので必要なトルクの絶対値は比較的小さい。

ディスクカッタの移動速度が速すぎると軸受けやディスクカッタ先端の温度が上昇して寿命が短くなる。葛野川を含めて、これまでのデータを検討してみると 432 mm ディスクカッタの上限移動速度は 1.5 ～ 2.5 m/s であることがわかった。そこで小丸川では安全側をとり、もっとも外周に近いところ（ゲージ部）に取り付けたディスクカッタの最大移動速度を約 1.5 m/s に設定した。

通常の運転状態では、カッタヘッド前面が岩盤に均等に当たっているが、時としてこの前提が崩れるときがあり、その場合には偏荷重がカッタヘッドに加わることになる。偏荷重が加わっても、カッタヘッドの軸受けの損傷が生じないこと、過度の振動が起こらないこと、グリップなどの支持力に問題が生じないことを前提に設計する必要がある。しかしながら、偏荷重をどのように見積もり、どのように対処するかについては確立された方法はない。そこで、この点もこれまでの経験を精査した上で慎重に検討を加えて設計に反映させた。例えば、もっとも厳しい条件の一つとして、斜坑上半分が硬岩でここには定格のカッタ荷重 P_n が加わっ

Fig.3 Developed shaft reaming machine.

Fig.4 Cutterhead for Omarugawa plant.

ており、斜坑下半分は軟岩でこの部分のカッタ荷重は 0 であったとする。この場合には、斜坑軸方向の偏荷重は $P_n \times (\text{カッタ数}) / 2$ であり、着力点は TBM 本体の中心より $(2\pi) \times (\text{カッタ平均取付半径})$ だけ上方にずれる。よって、この力によってカッタヘッドのもたらされるトルクは両者の積となる。

最内周 1 個のみは許された空間が狭かったので、主として取り付け方を変えた 432 mm シングルディスクカッタ（特殊カッタ）とした。シングルディスクカッタの配置については、葛野川のリーミング TBM で特に不具合は無かったので、小丸川のリーミング TBM でもその設計方針を踏襲した。その結果小丸川のリーミング TBM では、432 mm のシングルディスクカッタを 28 個とし、最内周 1 個のみ葛野川と同じ特殊カッタとした。なお、小丸川では事故防止と工程短縮のために導坑のインバートブロックを掘進前に撤去しなかったため、葛野川と異なりインバートブロックも掘削することが必要であった。このため、インバートブロック掘削用に 305 mm (12 インチ) のツインディスクカッタを 1 個とインバート掘削用カッタも新たに装着することにした。前者を 305 mm としたのは、許された空間が狭くて 432 mm ディスクカッタが装着できなかったためである。このようにディスクカッタの

径を小さくすることにより耐久性が損なわれるが、このディスクカッタは岩石よりも強度が低いコンクリートを掘削するためにのみ使用したので問題は生じなかった。また、後者は 305 mm ツインディスクカッタで掘り残された部分を切削するためのウエッジ型ビットである。

カッタヘッド外周板と坑壁の隙間は、ずりを噛み込まない寸法とする必要がある。ディスクカッタの場合には、ディスクカッタ間の岩片がはがれるので、隣接するディスクカッタ間隔（斜坑半径/ディスクカッタ数）が、ずりの代表寸法の目安となる。葛野川の TBM でのディスクカッタ間隔は約 100 mm であり、安全側を見込んでカッタヘッド外周板と坑壁の隙間は 240 mm としたが、これで特段の不具合はなかった。そこで、小丸川の TBM でもディスクカッタ間隔は約 100 mm であったので、隙間 240 mm を採用した。さらに、大きなずりが隙間入り込んでカッタヘッドを損傷させることがないように、パーチカルシューの中央に脱着式の制限板を設けた。

斜坑切り下がり TBM においては、掘削中のカッタヘッド後面に人や物が落下しないようにカッタヘッド後面に遮蔽板の設置が必要である。葛野川の TBM ではカッタヘッド後部に全面にわたり設置した。しかし、ずり処理のため小丸川の TBM では、遮蔽板の下半は開放するようにカッタヘッド後部上半のみの設置に変更した。なお、開放部にはネットを設置し別途安全対策を実施した。

葛野川では円形支保（機内リング支保）を建て込む計画であったが、作業性等の問題で吹付けによる支保に変更となった。また、葛野川ではファン（fan）を装備した空冷式モータを使用していたが、このファンが吹付けの際に発生する粉塵を吸い込んで損傷したことがあった。そこで小丸川では、損傷の恐れがあるファンがない水冷式モータに変更した。

葛野川ではカッタヘッドを後退させる場合に、想定以上の力が必要となる場合があった。そこで、小丸川ではスラストジャッキ（Fig. 3）の容量を向上させた。また、葛野川では保持ジャッキ（Fig. 3 の Backup trailer support jack）を用いて後続台車（Fig. 3 の Backup trailer）を後退させる場合にも、想定以上の力が必要となる場合があった。この保持ジャッキに必要とされる後退力 F について考察してみる。まず、TBM 本体後部質量 W_L と後続台車質量 W_1 に、 $g \sin \theta$ を掛けた力が必要である。次いで後続台車と坑壁の摩擦係数 μ_1 として、 $\mu_1 g W_1 \cos \theta$ が摩擦抵抗として加わる。さらに、 $g W_L$ がメインビームに加わった状態で TBM 本体後部が移動するので、メインビームのスライド部の摩擦係数を μ_2 として $\mu_2 g W_L \cos \theta$ が摩擦抵抗として加わる。これらを加え合わせると次式となる。

$$F = \{ (W_L + W_1) \sin \theta + \mu_1 W_1 \cos \theta + \mu_2 W_L \cos \theta \} g \quad \cdots (3)$$

上式右辺で、第 1 項は正確に見積もれる。第 3 項の μ_2 は、下記①～③の工夫をして設計・製作された面間の摩擦抵抗であり 0.05 ～ 0.1 の間で変動するが想定外の値を取ることはない。①ブッシング鋼と焼入れ鋼を使用。②面の仕上げは仕上げ方向を指定。③稼働中は局圧潤滑材（モリブデン）入りのグリースを自動給油。結局、第 2 項の μ_1 が通常の 0.2 より相当に大きな値をとる場合も想定し、それに見合うように保持ジャッキの能力を増大させた。一般に斜坑用 TBM では、摩擦係数の設定が重要である。

4・2 反力受装置

ノーズグリップ 葛野川のノーズグリップでは、3 本のジャッキを配置した。小丸川では、導坑にインバートブロックが残った状態で、これを切削しながらリーミングを行う。このため、小丸川では下部の空間をできるだけ広く開けてインバートブロッ

クの切削とずり排出が円滑におこなわれるように、ジャッキを左右に配置した水平対抗型とした。ジャッキのストロークについては、導坑の線形不良（曲折）に対応可能なように引き側のストロークを葛野川より 20 mm 増加させた。

ノーズグリップのシュー形状について検討した。葛野川では角型シューとして、回り止めをつけた。しかしながら、導坑の坑壁の崩落などにより回り止めに損傷する場合があった。そこで、小丸川ではどの方向を向いていてもかまわないので、回り止めに不要な円形シューを採用した。水平坑用の TBM におけるシュー面圧の基準はグリップ部で 5 MPa であるが、ノーズグリップ用シューについては、葛野川の実績から単純投影面圧が 8 MPa とした。なお、このシュー面圧に対応できない地山の場合には、フロントサポートも使用して掘進を行うものとした。

ノーズグリップはカッタヘッドより飛び出ており、もしこれが長い場合、発進時は天端と、到達時は下部の岩盤にあたってしまうので、あたってしまうような部分の切り上げが必要となる。このため、小丸川ではノーズグリップの飛び出しを可能な限り小さくした。

メイングリップ 水平坑用 TBM においては、スラスト推力負荷時のグリップシューのすべり止めのため、シュー外面に硬化肉盛（凹凸）を実施することが多い。一方で、この硬化肉盛により坑壁の損傷が生じることもある。硬化肉盛を実施した葛野川の実績では、グリップ推力の設定を水平坑用の TBM に比較し余裕を持った設計としていたため、すべりが生じるという問題は少なかったが、坑壁の損傷が多少見られた。そこで、小丸川ではグリップ推力の設定は葛野川の考えを踏襲して行うが、硬化肉盛は実施しなかった。ただし発進時において、小丸川の場合には鋼材でつくった四角形の人工壁に沿わせるためにグリップに装着する補助シューは、坑壁の損傷の問題がないため硬化肉盛を実施して、すべりに対する安全性の向上をはかった。

葛野川（二本目）では、ストロークを 200 mm（引き側）、400 mm（押し側）とした。これで掘進中の支障はなかったため、小丸川でも設計方針を踏襲した。ただし、最大吹付け厚が 200 mm とより厚くなることを想定して引き側にストローク中心を 50 mm だけずらして、ストロークを 250 mm（引き側）、350 mm（押し側）とした。

葛野川ではグリップジャッキの横ずれ（ジャッキ中心と TBM 中心との水平方向のずれ）防止として、シェアピンを設置するとともにグリップの伸び過ぎに対して表示警告を行っていた。しかし、シェアピンが切断するとその復旧に時間を要した。このため、葛野川ではシェアピンを撤去し、グリップの横ずれを検知するセンサを設置し、横ずれ量が一定範囲内でしかグリップが操作できないようインターロックを設けた。この対策により、掘進では大きな問題はなかったが、グリップの左右の摺動抵抗差による横ずれは生じるため、これを修正するために時間を要する場合があった。このため、小丸川のリーミング TBM では横ずれ量の検知とインターロックの設置をした。さらに一定の横ずれ力までは抵抗できるように、グリップジャッキと TBM 間に横ずれ防止の修正ジャッキを装着した。この修正ジャッキを装着したことにより、グリップジャッキと TBM 中心が横ずれしてしまった時の修正が容易になった。

4・3 パーチカルサポートとルーフサポート

パーチカルサポート 葛野川でも機体下部に設けたパーチカルサポートのシュー中央には、ずり排出用に開口部があったものの開口が小さかったために、吹付けモルタルの跳ね返りが固着し開口部が塞がった状態になった。小丸川のリーミング TBM では、

シュー中央の開口を大きくすることにより、閉塞が生じにくい構造とした。ただし、この開口部はカッタヘッドへ大きなずりが入らないよう脱着式制限板は設けるものとした。

葛野川のリーミング TBM では、到達部などで推力とストロークに余裕が少なかった。このため、小丸川のリーミング TBM では到達部のシミュレーションを行い、押し付け力・ストローク（伸び側）について向上をはかるものとした。

ルーフサポート 小丸川のリーミング TBM では、ルーフサポートシューに地山崩壊時の薬液注入用パイプ穴を 5 箇所設置した。到達部における地山との干渉を最小限に抑えるため、ストローク引き代を増して、ルーフサポートの最低高さを低くした。それでもなお、到達口の天端の一部を先掘りしておくことが必要であった。

5. ま と め

小丸川における斜坑リーミング TBM による掘進は、まず機体先端に設けたカッタヘッドを切羽に圧着して回転させる。岩盤はカッタヘッドに取り付けたディスクカッタによって圧砕されていく。ずりはカッタヘッドに設けられたスクレーパによって、カッタヘッド中心へと掻き寄せられた後に、導坑に投入されるとその後は自然落下していく。斜坑軸方向に 1.5 m だけ掘削するといったんカッタヘッドの回転を止めて掘削を中止する。そしてフロントサポートによりカッタヘッドとその支持部を固定して、1.5 m だけ TBM 本体と後続台車を前進させる。この動作を盛り替えと称することがある。以上の手順は、このリーミング TBM の設計前に想定した手順と同じであり、実施工でも問題なく実施できた。

小丸川の導坑は TBM で下から上にと切り上がって掘削されたが、この導坑を掘削中に斜坑にそった岩盤に関する詳しい情報を得ることができた。前にも述べたように、これがリーミング TBM 工法の大きな利点である。高森ら¹⁶⁾は、“レイズボーラ掘削データから切上げ掘削時の地山評価を行う場合、以下に示す評価方法が適用できると考えている。対象地山の種類を想定する場合、掘進率（掘進速度／給進力）に着目し、特に掘進率が高い区間については地山が変質していると考えられる。また、今回の場合、中硬岩と硬岩の境界は掘進率が 20 cm/min/kN 程度であった。対象地山の亀裂間隔を想定する場合、給進力、回転トルクに着目し、給進力が安定せず回転トルクの上昇がある場合、対象地山は不均一な地山で、亀裂が発達していると判断する。”と述べている。

なお、ここで言う給進力とはカッタヘッドに加えるスラスト推力である。リーミング TBM で掘削した時の状況は、導坑で得られたデータから想定したとおりであった。

本研究を通じて、リーミング TBM 工法は、導坑と拡張の二工程となるが、導坑掘削中に岩盤状況に関する詳細な情報が得られるので、安全側を見た工法であることを確認できた。また、既設導坑と拡張坑の両方で反力を取り掘進を行う方法は、方向制御が比較的容易であり、どのような場合にも柔軟に対処可能なことが確認できた。コーン型カッタヘッドを採用して、その傾斜角度を 30° とした。製作は比較的容易であり、掘削は順調でずりの排出にも問題のないことが確認できた。なお、今回のリーミング TBM で、改良の余地がある点を 1 点だけあげるとすれば、発進及び到達時の工程短縮である。

今後はリーミング TBM の採用が増加すると予想している。例えば、新興国では大規模水力発電所の新設が多く計画されているが、不便な土地で修正が効きにくいプロジェクトでしかも大断面の斜坑を掘削する必要があるときには、安全側を見込んでおり多様な岩盤に対応できるリーミング TBM が適していると考える。新規にリーミング TBM を設計する際には、本論文で開示した選定手順、改良手順が参考になる場合が多いと考える。

謝辞 本研究を行うにあたりご協力いただいた九州電力（株）、東京電力（株）、（株）奥村組、奥村組・佐藤工業・大豊建設・浅沼組共同企業体、奥村組・銭高組共同企業体と関係各位に感謝の意を表する。

References

- 1) T. Nishida: Denryoku Doboku, No.155 (1978), 45-54.
- 2) T. Nishida, Y. Matsumura and Y. Miyanaga: JSCE Magazine, **66**, No.10 (1981), 16-24.
- 3) T. Nishida, Y. Matsumura and Y. Miyanaga: Denryoku Doboku, No.172 (1981), 54-67.
- 4) T. Nishida, Y. Matsumura and Y. Miyanaga: Kensetsu no Kikaika, No. 348 (1979) 21-26.
- 5) T. Nishida, Y. Matsumura and A. Yamada: Kensetsu no Kikaika, No. 364 (1980) 29-37.
- 6) T. Nishida, Y. Matsumura and A. Yamada: Kensetsu no Kikaika, No. 377 (1981) 23-30.
- 7) K. Ito and K. Kusano: Tunnels and Underground, **20** (1989) 963-970.
- 8) Y. Nagasaki, H. Ikeda and S. Koyanagi: Denryoku Doboku, No.336 (2008), 16-21.
- 9) Y. Kashiwagi, T. Sonoda and H. Ikeda: Denryoku Doboku, No.303 (2003), 40-44.
- 10) JTA: TBM Handbook (JTA, Tokyo, 2000), pp. 31-35.
- 11) Atlas Copco Robbins: Project & Product News From Atlas Copco Robbins, No.1 & 2 (1996).
- 12) S. Wallis: Tunnels & Tunneling International, **29** (1997), 48-50.
- 13) T. Terada, S. Okubo, K. Fukui and K. Kubota: Tunnels and Underground, **41** (2010) 51-60.
- 14) Y. Kashiwagi: JCRM News, No. 072 (2004).
- 15) S. Takamori, T. Miura and N. Kawabe: Proc. 58 th ISCE Annual Meeting (2003) pp. 37-38.
- 16) Y. Nagasaki, K. Uchida and H. Akamine, R. Shinba: Tunnels and Underground, **42** (2011) 43-49.