

TBMによる水圧管路の掘削と鉄管の設計について

電源開発(株) 堀 正 幸, 〇川 島 由生雄

1. 概論

下郷揚水発電計画では、水圧管路の斜坑掘削にトンネル掘進機(TBM)が使用された。

本報告は、TBMによるトンネル掘削、岩盤の工学的諸性質と掘削との関係、ならびに周辺岩盤の緩みを考慮した埋設鉄管の設計手法を述べるものである。

2. TBMによる掘削¹⁾

長さ約500m、傾斜37°の2条の水圧管路を、1979年5月～1980年12月の約20ヶ月にわたり掘削した(図-1参照)。最初パイロット機により下から上へ直径3.3mで掘削し、これをリーミング機で上から下へ直径5.8mに拡幅した(図-2参照)。掘削の平均速度はパイロット機が約5.0m/hr、リーミング機が約3.2m/hr、最大日進はパイロット機が30.8m、リーミング機が26.0mであった。岩盤に細かいキレツが発達しているので小さなスラスト力とトルクで掘削することが可能で、カッターの摩耗も少なかった。新品と交換したカッターはパイロット機掘削で49組、リーミング機掘削で101組であった。

掘削後の地山の補強は次の様に行なった。TBMは発破工法に比べて周辺の岩盤を損傷せず非常に安定していた。又、小崩落もあったが、これは主にトンネルの切羽付近でのみ発生している。

パイロット坑掘削

では、破砕された区間だけロックボルトと支保工を使用した。ロックボルトは長さ1.0m、直径22mmで、両者ともリーミング坑掘削時に岩盤と一緒に切削可能なグラスファイバー製のものを使用した。

これに対してリーミング坑掘削時には、破砕帯区間の補強に鋼製のロックボルト・支保工を使用した。またほぼ全区間で厚さ約5mmのレジン吹付を行ない肌落ちを防止した。清水箇所にはレジン吹付の代りに厚さ5cmのコンクリート吹付を行なった。

水圧管路全長の約75%にレジン吹付を、約20%にコンクリート吹付を行ない、ロックボルトと支保工を使

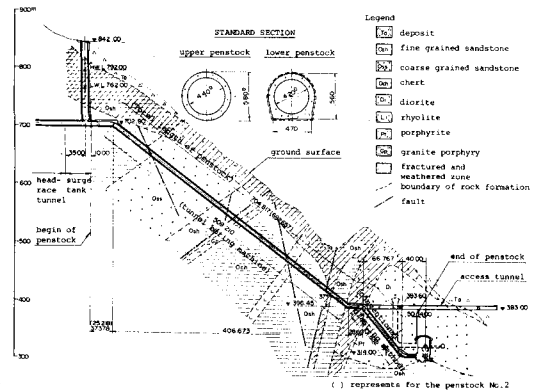


図-1 水圧管路地質横断面図

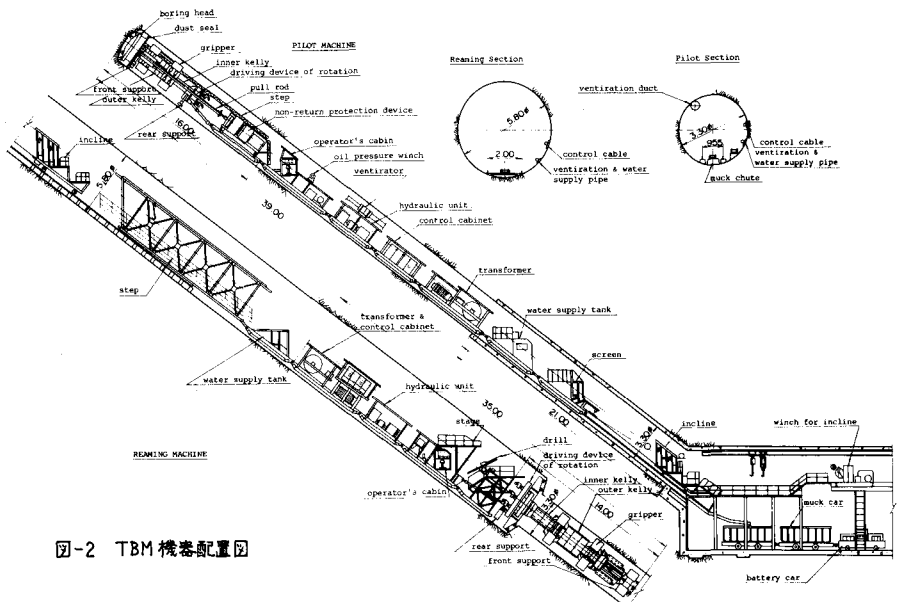


図-2 TBM機器配置図

用した区間は約5%であった。

3. 掘削における岩盤力学的考察

3.1 室内および現場試験

TBMによるトンネル掘削と岩盤の諸性質の関係を岩盤力学的見地から理解し、水圧鉄管の設計資料を得るために、室内および現場試験を行なった。

室内試験としては、超音波速度の測定、ショアー硬さ、一軸圧縮試験、圧裂引張試験を行なった。岩石試料は簡易ボーリング機により坑内から採取した。

細粒砂岩の一軸圧縮強度は比較的低く、200～500 kg/cm^2 であった。粗粒砂岩は約300 kg/cm^2 、珉岩と流紋岩がそれぞれ800 kg/cm^2 、1,500 kg/cm^2 であった。図-3は採取した岩石試料の一軸圧縮強度と弾性係数をプロットし、DeereとMillerの方法で分類したものである。

現場では孔内載荷試験を行なって岩盤の変形係数を求めた。坑壁に垂直に直径66mm、深さ1.5mの削孔を行ない、ジャックタイプの孔内載荷試験機を使用し、求められた岩盤の変形係数は $3 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^2 \sim 7 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^2$ の範囲であったが、破砕帯区間で $1.1 \times 10^{-4} \text{ kg/cm}^2$ という低い値も得られた(図-4参照)。

掘削面付近に発生する緩み領域を測定するために1号水圧管路において弾性波探査を行なった(図-4参照)。試験方法は図-5に示す様に一番端のピックアップの近くをハンマーでたたいて波を発生させ、到達した波をオシログラフで記録した。

代表的な走時曲線を図-6に示す。オ2層つまり緩んでいない岩盤内での伝播速度 V_2 は2,450 m/sec であり、緩み領域であるオ1層内での速度は1,780 m/sec であった。図-6の結果から計算すると緩み領域の厚さは最大0.5mであった。他の区間のオ1, 2層内の速度を図-4に示す。

これと比較するために、同じ下郷地点の放水路トンネルでも試験を行なった。トンネルの形状は標準馬蹄形で、直径5.1m、断面積約25 m^2 である。一部は在来工法により掘削を完了し、H-150の鋼製支保工を使用している。又、残りの大部分はNATM工法を採用し、ロックボルト(1断面に5～6本)と5cmの吹付コンクリートを施工している。地質状況は両地点ともほぼ同じで、細粒砂岩と珉岩の互層である。図-7に示す様に、在来工法の断面では緩み領域が0.6～1.3mであった。一方NATM工法の断面では0.3～0.7mとなった。これら両者の発破工法においては、緩み領域内の速度は、基岩内での速度4,000～5,410 m/sec から650～880 m/sec にまで低下した。従って V_1/V_2 の値1/4.5～1/6.8は、TBM掘削区間で得られた値1/1.2～1/1.7に比べるとかなり低くなっている。

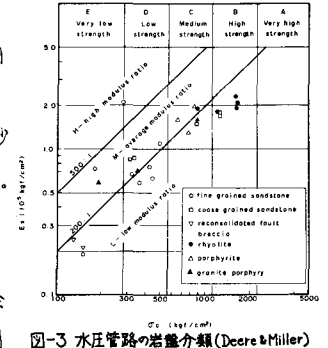


図-3 水圧管路の岩盤分類(Deere & Miller)

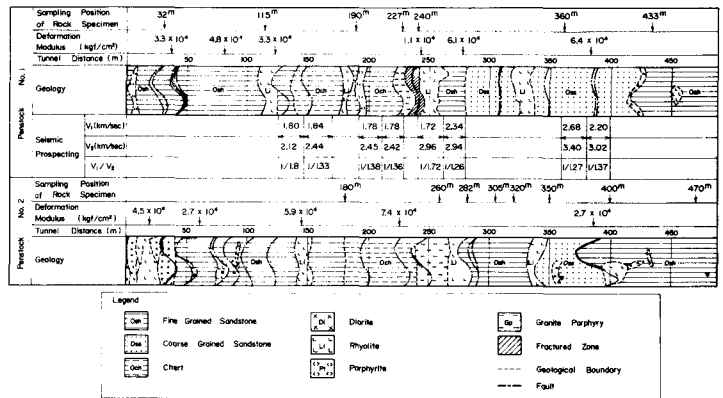


図-4 水圧管路の地質および岩盤の物性値

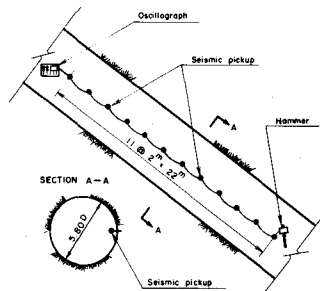


図-5 弾性波探査試験要領図

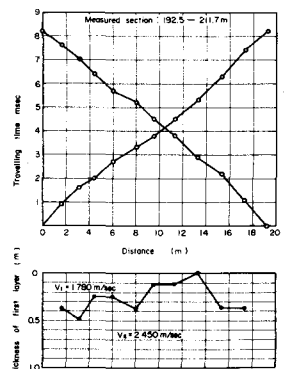


図-6 水圧管路弾性波探査試験結果

従って、TBM掘削による周辺岩盤の緩みはほとんど無視してよいと言える。又、他の発破工法では明白な厚い緩み領域が発生する。

3.2 TBM掘削と岩盤の諸性質の関係

TBMによるトンネル掘削能率は、掘進速度、ボーリングヘッドに作用するスラスト力、トルクにより定量的に評価することが可能である。しかし、トンネル掘削は運転者の技量に負う所も大きく、地質状況や岩盤の性質も場所ごとに变化するので、掘削と圧縮強度や引張強度などの岩盤の性質を単純に結びつけることは困難である。

簡単のために議論をパイロット孔掘削だけに絞って考

える。ボーリングヘッドに作用するトルクとスラスト力は広範に変化するが、これらのデータを整理してみると、スラスト力とトルクの比が4~8という比較的狭い範囲に集中することがわかった。トンネル掘削と岩盤の力学的性質の関係を調べるために、この比を各種の岩盤について求め、その岩盤の力学的性質と比較した。図-8は、スラスト力とトルクの比と、岩石の性質の1つのパラメータである σ_c / S_t の関係をプロットしたものである。 σ_c は一軸圧縮強度、 S_t は引張強度を表わす。

実際に掘削中に測定したトルクは10~23 ton・mに変化した。スラスト力はさらに広範に30~200 tonまで変化した。

一方 σ_c / S_t は6~14の間の値である。図より、スラスト力とトルクの比と σ_c と S_t の比の間にはほぼ線形の関係があることがわかった。今回はデータが少なかったが、トンネル掘削と岩盤の力学的性質の関係を解明するには、より多くのデータを収集することが必要である。

3.3 埋設鉄管の設計

水圧を受ける鉄管に発生する引張応力の大きさは、周辺の岩盤の変形係数、詰込コンクリートの巻厚、水圧の大きさ、鉄管の直径と板厚などの諸条件により決まる。

設計水圧は、静水圧、水撃圧、サージング圧を含めると、水圧鉄管末端において最大62 %になる。又、鉄管始点では12 %であり、その中間断面ではほぼ直線的に変化する。

周辺の岩盤の緩み領域が埋設鉄管の応力に影響を与えることもよく知られている。そこで埋設鉄管の応力に与える緩み領域の影響を知るために、解析的な検討を試みた。解析条件を模式的に図-9に示す。ここに、“ P_i ”は内水圧、“ P_r ”は反力として鉄管に作用する圧力である。

P_i と P_r の比は、岩盤が一部分を受け持っている水圧の割合を表わすもので、岩盤の内圧負担率、 λ と呼ばれ、次の様に定義される。

$$\lambda = \frac{P_i}{P_r} \quad (1)$$

埋設鉄管の応力は次式により与えられる。

$$\sigma = \frac{a}{t} (1 - \lambda) P_i \quad (2)$$

ここに、 σ は埋設鉄管の応力を、 t は板厚を表わす。厚肉円筒理論により図-9の仮定に立てば、内圧負担率は

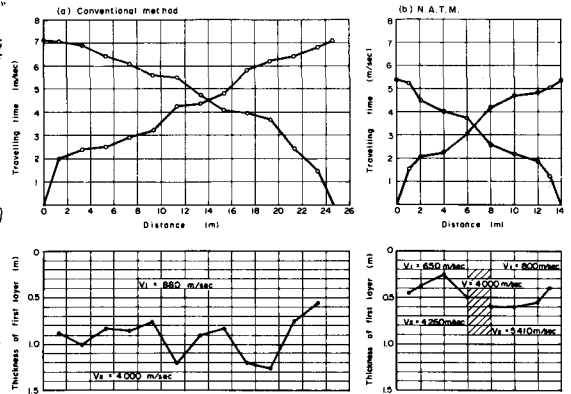


図-7 放水路トンネル弾性波探査試験結果

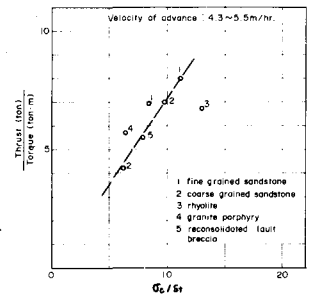


図-8 スラスト力/トルクと σ_c / S_t の関係

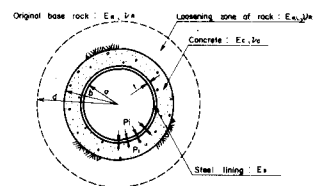


図-9 埋設鉄管の応力解析条件

岩盤、コンクリート、埋設鉄管の物性値の関数として表わすことができる。

一方、緩んだ岩盤の弾性係数が緩んでいない岩盤の弾性係数よりどの程度低下するかは十分知られていなかった。前述の弾性波探査の結果を参照すると弾性係数の低下の割合が40～60%と仮定することができる。従って E_{RL}/E_R の値は計算上0.4とする。計算結果ならびに条件を図-10に示す。

図-10から明らかな様に、岩盤の内圧負担率は緩み領域の増加に伴って減少する。従って圧カトンネルをTBMで掘削した場合、在来工法と比較して内圧負担率を最大7.4% (TBM 56.7%—在来工法49.3%) も大きく取ることができる。この事実は経済的な設計が可能であることを示している。図-10の計算結果によれば、埋設鉄管の重量は約15%も節約できることになる。

在来の築破工法による原設計時点では、上部水圧管路の埋設鉄管全重量は3,500トンであったが、TBMを使用することにより鋼材重量を2,900トンと600トン(17.1%)節約することができた。

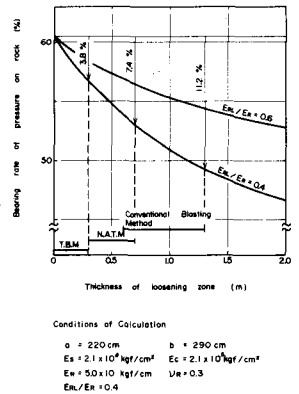
4. 結論

TBMによる水圧管路掘削を通して、岩盤力学的見地からトンネル掘削に関する様々な考察を試みた。本報告の主な結論をまとめると次の通りである。

- (1) 岩盤には細かいキレツが発達していたり幾分破壊されていたりしていたが、掘削中重大なトラブルは発生しなかった。トンネル掘削は十分満足できるものであり、TBMによる斜坑掘削の日本で最初の成功例となった。
- (2) ボーリングヘッドに作用するスラスト力とトルクの比は岩盤の力学的性質と密着に関連していると思われる。本研究において、スラスト力とトルクの比と岩石の一軸圧縮強度と引張強度の比の間にほぼ線形関係が成立することが認められた。
- (3) TBMによる掘削では周辺の岩盤はほとんど損傷されない。弾性波探査によりトンネル周辺に発生する緩み領域も測定したところ、TBM掘削では最大0.3m、在来の築破工法では0.6～1.3mであった。
- (4) TBMの使用により緩み領域が減少するので、埋設鉄管の設計が経済的になる。在来の築破工法に比べて鉄管の費用を約17%節約することが出来た。

参 考 文 献

- 1) TBMによる斜坑への挑戦, 1981年9月, 土木学会誌, V. 61, 66-70



ABSTRACT

Excavation of Inclined Tunnel by Tunnel Boring Machine and Design of Steel Lining

by Masayuki Hori, Yukio Kawashima

- Electric Power Development Company, Ltd. -

In the project of Shimogo pumped storage hydro power station of 1,000 MW, a tunnel boring machine was employed to excavate the inclined tunnel as the penstock. The tunnel has been completed with 5.8 m diameter and 37° inclination angle. This performance was the first success in Japan in the excavation of an inclined tunnel by TBM.

The use of the machine has brought not only a good performance of excavation even in bad geological condition, but also several advantages in the design of the steel lining in the penstock.

It is found out throughout the investigation of the tunnelling performances that there exists a linear relationship between the ratio of thrust force to torque acting on the boring head and the ratio of uniaxial compressive strength to tensile strength of the rock excavated. The surrounding rock is not almost loosened by the excavation if TBM is employed. The thickness of the loosening zone generated in the circumferential area of the tunnel was measured by a seismic prospecting in the field. From the results, the thickness was found to be 0.3 m at most, which was relatively small in comparison with those caused by the conventional blasting method. Consequently, for the sake of the reduction of the loosening zone by the use of TBM, a design of the steel lining in the penstock becomes economical. The cost of the steel lining saved by about 17% compared with a cost required for a case when the conventional blasting method would be employed.