

(44) 有間ダム洪水吐トンネルの設計・施工と岩盤力学的考察

飛島建設(株) 福島 啓一

1. はじめに 有間ダムは埼玉県が入間川総合開発事業の一環として、荒川水系入間川の支流有間川に建設中の多目的ダムである。このダムは中央土質しゃ水壁型のロックフィルダム ($H=83.5\text{ m}$, $L=260\text{ m}$, $V=1,600,000\text{ m}^3$) であるが、ダム地点の兩岸は山がせまっており通常採用されている開水路式の洪水吐を建設することは非常に困難である。そこでダム右岸側に呑口部で幅9 m、直高25 mの長円形、下流部は $\phi 7.0\text{ m}$ 円型のトンネル式洪水吐が採用された(斜坑部 $\ell=102\text{ m}$ 、水平部 $\ell=343\text{ m}$)。地形上から呑口は右支川、白谷沢に設けられたが、この位置は地質が悪く、所要の巻立厚さをとった掘削断面は呑口部で幅14.70 m、高さ27.0 m、断面積 $A=270\text{ m}^2$ 、下流側は $\phi 8.70\text{ m}$ のラッパ状に形状の変化する、勾配47°の斜坑を掘削する必要が生じた。

地質は秩父古生層に属し、チャート及び粘板岩の互層であるが洪水吐位置付近をトンネルにはほぼ平行に断層が走っており、その影響で強く破碎され粘土化している。

側壁導坑先進方式など種々の施工法を考えたが、斜坑のため非常に施工性が悪く、安全性にも問題が残ったので、当時ようやく普及し始めた新オーストリアトンネル工法(NATM)を採用することにし、1980年8月坑口付けを行い、1981年10月に $\ell=102\text{ m}$ の斜坑トンネル掘削を完了した。

断面の大きさ、地質の悪さにおいて世界的にも有数の規模のものであると共に、NATMの設計思想についても従来の考え方と違うところがあるので、設計、施工についての考え方、施工実績、計測結果などについての岩盤力学的側面を主にして報告する。

2. 計画 このトンネルの計画に当って特に考えなければならなかった点は次の諸条件である。

①断面が大きく、しかも斜坑であるので、例えば掘削が半分位進んだ所で天端付近のトンネル支保を補強することは非常に困難であり、その様なことは極力避けたいこと。

②切羽の高さが非常に高いので(max 26.0 m, min 14.0 m)機械類の搬入、入換え、ずり出し、人間の作業足場などが非常にむずかしい。ベンチカットにするとしたらベンチの長さ、高さ、又ベンチを水平にするのか、斜坑と同じ勾配にするのか?等問題は多い。

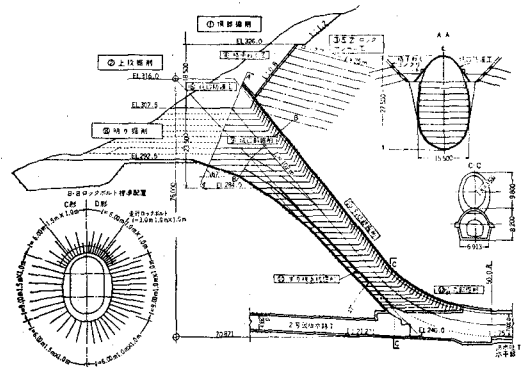
③掘削開始からインバート閉合までの時間として従来のNATMでは1カ月以内を目標にしていたが、ここでは2カ月以内にするのはどうしても困難。ベンチをあまり短くすると切羽鏡の保持が困難になる。

④ずり出し方法、明り部掘削との関連、施工機械や作業員の出入方法、作業足場、測量や計測の方法などその他にも問題は多い。

従来の考え方からあまりはずれない様にして施工法を考えると、①明り部の掘削がすんでから坑口をつける。②ずり出しのため、トンネル底盤近くにずり抜孔を掘り、切羽及び各ベンチよりこの孔へずり落し、下にある既設転流トンネルよりずり出しする。③側壁導坑先進などはむずかしいので天端から順次切下って来るが、ずり出しの便、及びインバート閉合までの時間を短くするためベンチは極力短くする。足場の悪さは特殊な作業足場で補う。

この様な施工法は相当な設備を必要とし、しかも施工性は悪いと考えられ次の様な方法を考えた。

①トンネルは上半から順次切下る。②斜坑であるが掘削の作業ベンチはすべて水平とする。ベンチ長さは明り部も含めてその高さの全長とし、トンネル切羽も含めて一段のベンチ掘削がすべて終わってから次のベンチにとりかかる。トンネル天端部分はベンチ1段(高さ1.6 m)の切下りに対して斜め方向に2.0 m進むことになるので、これを1 mづつ2回

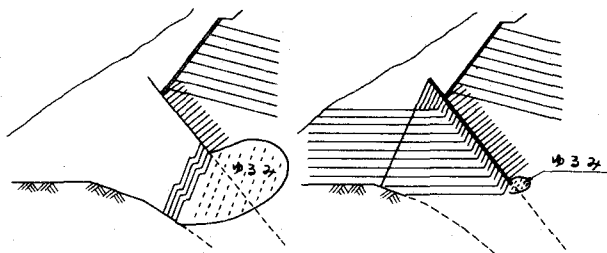


施工順序図

に分けて掘り進む。③このため、ある断面で考えると上半の掘削開始からインバート閉合までの時間が非常に長くなる（最大約6カ月）が、支保の方法などで対処する。④施工基面が水平なので、機械の稼働、作業員の安全にとっては非常に都合よく能率よく作業出来る。⑤E L 285 m（明り部側ヘダンプトラックで搬出出来るギリギリの高さ）までは重機土工により明り部掘削と平行して掘削、ずり出しを行った。それ以降は先に下にある2号転流トンネルからずり抜孔を掘っておき、そこへずりを落し、ダンプトラックで搬出する。機械の搬出入にはインクラインを用いる。

これらの決定は従来の常識よりすれば岩盤力学的な配慮を無視して施工の都合だけを考えた様にうけとられるかも知れないが、必ずしもそうではない。むしろ従来のNATMの考え方の間違いを正した面も多く、しかも施工上の要求にも応えられる計画としたつもりである。

①作業能率は非常によい。このため掘削してから支保を設置するまでの時間が短縮出来る。②トンネル工事で地山をゆるめるのは切羽鏡面からのゆるみが最も大きい、鏡面が小さかったので、地山をゆるめる割合が非常に小さかった。③トンネル工事では地山を不必要にゆるませないことが大切であり、そのためには上半掘削からインバート閉合までの時間を普通1カ月位地下鉄工事などの地表沈下を厳しく制限されるある例では9時間にまで短くしている。第一平石トンネルでの実測によると、下半掘削などの次の作業を進めない限り、単に時間がたっただけでは応力や変形の増加は殆んどないので、Rabciewiczが時間の係数としての変形応力の増加と認識していたものは、実は切羽からのなれや後続作業による三次元的応力配分の影響の誤認ではないかと思われる（勿論非常にかぶりが深く、地質も悪い場合などは真の時間の影響もあり得る）。むしろ時間の影響としてここで提唱したいのは、掘削してから支保するまでの時間と、無支保のまゝにしてあるために地山のゆるみが起る度合いとの積の累計である。上半のまま置いて多少ゆるみが進行する様であればその期間も影響する。吹付コンクリートだけの支保は次の段階の掘削（例えばベンチ掘削）をした時、掘削面付近をゆるませる割合が大きいの、ゆるみ易い地山の時はアンカーボルトを併用することが大切である。



④大きな地下空洞を掘削している時、下の方を掘った影響で天端近くに補強を要する様な破壊が起ることは非常にまずいので極力（絶対と云いたい位）その様なことは起らない様計画を立てる必要がある。地山を弾性体又は弾塑性体と考えるなら、10 m以上も下でベンチ掘削したことにより天端アーチに補強を要する様なことは起らず、掘削盤付近で増アンカーなどの補強をすれば十分の筈である。

L. V. Rabciewicz は NATM の利点の一つとして若し支保（吹付コンクリート）が破壊しても、それが正しい NATM により施工をしたものであれば水平方向からのせん断で破壊されるが、このせん断破壊は非常にゆっくり起り、しかも一部分が破壊することで地山の応力を解放し、荷重が減るので自然に停止し、全体破壊には到らず、作業員にとっても危険でないことをあげている。しかし NATM の大トンネルへの応用がはじまると天端部に水平方向でなく鉛直方向にせん断破壊される例が生じて来た（Tauern, Tarbela, Arlberg 等）。天端が下向きにせん断されると応力開放による荷重の減少よりも、強度の低下やせん断破壊された部分に働く重力の方が大きくなり、したがって破壊は自然に停止せず、天端が落ちて来る危険があり、早急に補強する必要がある。Tauern トンネルの例ではこの様な破壊に対して脚部を厚くして支持力を増した厚い吹付コンクリートよりも、薄い吹付コンクリートとアンカーボルトの方が有効であったと報告されている。又、Tarbela ダム転流トンネルの破壊も短かすぎたアンカーボルトが原因と報告されているので、薄い吹付コンクリートと長いアンカーボルトの支保とした。又ベンチ高さを低くしてゆるみ防止に努めた。

この様にロックボルトを主体にした支保と低いベンチ高さは力学的に合理的な設計であり、インバート閉合までの時間の長いことは何ら障害にならなかった。

⑤トンネル掘削に当って地山のゆるみを防ぐことが大切なことは広く認められているが、NATM ではとりわけこの点を重視している。インバート閉合までの時間を規制したり、ベンチ掘削を左右に分けて行い、掘削から支保までの時間を短くしているのもそのためである。例えば Massenberg トンネルでは下半掘削に当って、土平部分を先に掘って早急に吹付けコンクリートとアンカーボルトで支保をし、大背部分は後で掘るという施工上からみれば非能率的なことまであ

えてやっている。それに引きかえ日本では第一平石トンネル（東北新幹線）、駒止トンネル（福島県、道路トンネル）、今市地下発電所（東電）などの代表的なトンネル工事においてすら、中央部を斜路を設けるなどして、先に掘っており、ゆるみ防止の理念はあまり重視されていない様である。

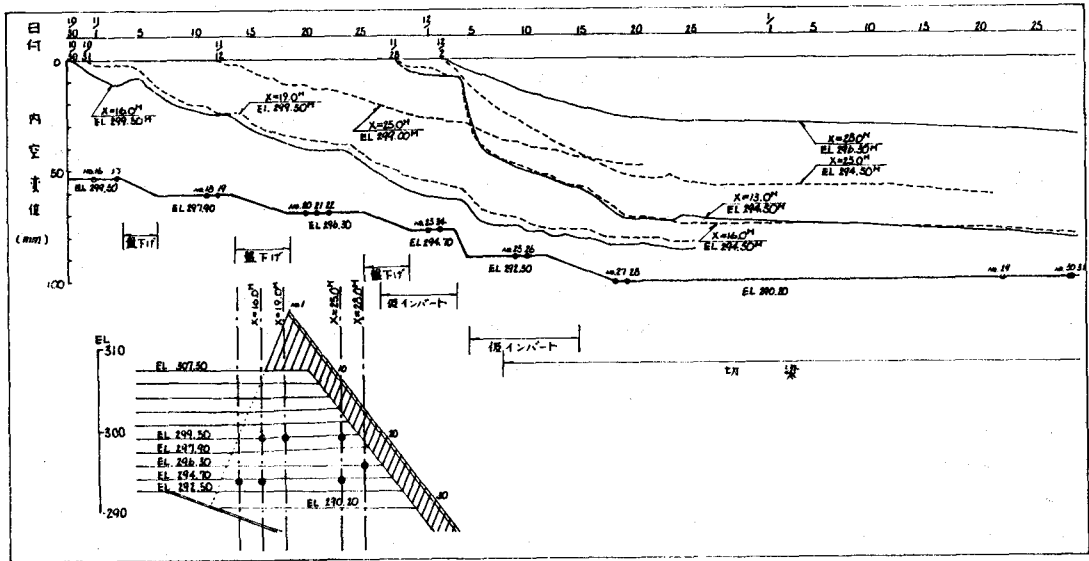
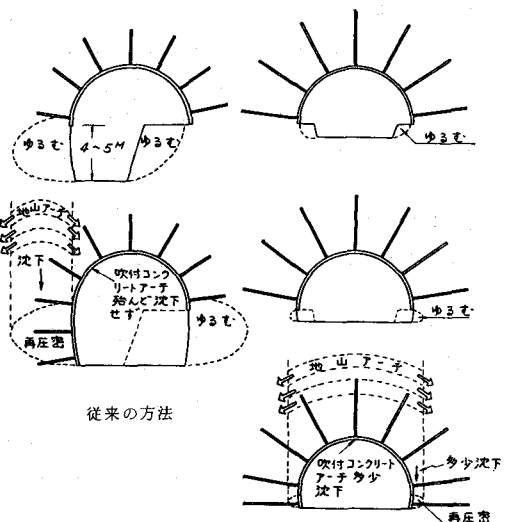
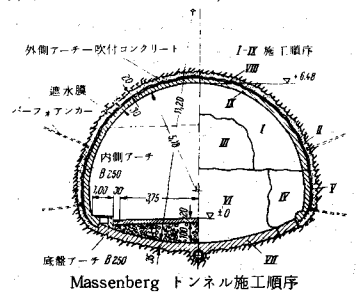
有間ダム洪水吐トンネルでもベンチ中央部を先にリッパ付ブルドーザーで掘削したが、これは上記日本の諸トンネルとは違って、ゆるみ防止と施工能率の両方を併せ考えたもので、ベンチ高さを従来より大幅に低くした所に特色がある。しかもTarbelaダム転流トンネルの場合の様に吹付コンクリートに高い応力が集中して、そこがせん断されると云う様なことも防いでいる。次にTarbelaダム転流トンネル等にならって施工した場合と、有間ダムで実際に施工した方法とを対比しながら説明する。

1段4.0～5.0mづつの掘削で側壁背面の地山は相当の範囲がゆるむ。上半アーチはトンネル長手方向に連続しているのて殆んど沈下せず、鉛直力の大部分はアーチ吹付コンクリートに伝わっている。掘削後直ちに側壁吹付コンクリートを施工するとこの鉛直力は新しく吹付けたコンクリートに伝わる。

吹付コンクリートの施工後に、一旦ゆるんだ側壁背面の地山は再び圧密され沈下する。そのため従来地山で負担していた鉛直荷重までもが吹付コンクリートの方へと転荷されて来る。こうして一段切下るごとに吹付コンクリートに働く鉛直荷重はますます大きくなり、先ず先端アーチ部が増加した荷重に耐え切れなくなり、そこでせん断破壊するものと思われる。

それに対し、一段のベンチ高さを低くし、しかもベンチ掘削から吹付コンクリート施工までかなりの時間をおき、しかも数10m間を一度に掘る、今回採用した工法はベンチ高さが低いので地山のゆるみが小さくすると共に、吹付コンクリートの脚部をしばらく開放しておくことで、吹付コンクリートが荷重を負担する割合を減らしており、立派に力学的合理性にかなっているものと思われる。

3. 施工の結果



施工はほぼ順調に進んだが、内空変形が10cm近くになったり、アンカーボルトの応力が降伏点を超えたりして種々議論をした後、仮インバート、切梁、追加のPCアンカーを施工したりしたが、全体計画を変更する様なことはなく、ほぼ当初の計画は正しかったと考えている。

①仮インバートの効果 このトンネルの様にベンチの段数が10段以上にもなり、しかもベンチの掘削を1～2mの1間づつ進めて、直ちに本インバートをつくり閉合して行くのではなく、全長10～30mを1回に掘ってしまうのでは仮インバートの効果はほとんどない。勿論一時的には変形をおさえる効果はあるが、これも掘削盤より2m～5m上では効果はない。これを撤去した時に仮インバートを施工しなかった場合に想定される量だけ、一気に変形してしまうだけの様である。

従来の考え方に引きづられて数回試みて見た。計測結果の一部を示す。

②切梁及びPCアンカーの設置

坑口部を8割程度切下った所で、一部のアンカーボルトの応力が降伏点を超え、内空変位も10cmを超えた。又、仮インバート撤去後数日間に3.5cmほどの内空変位が出たのを全体的に変形が早くなり初めたと見る意見もあって坑口部に切梁(H350×350—当初6本、追加12本)及びPCアンカー($\ell=20\text{m}$, 耐力 $P_y=134\text{t}$, 14本)を施工した。しかしこれらの支保材はいずれも地山に比べると非常に剛性が高く、特に切梁は座屈すると作業員に危険を及ぼすと考えられたので、途中でいずれも応力を低減させて行き、インバート閉合後にはすべての応力を除去したが、この時の応力除去($\Sigma P=900\text{t}$)により内空変位は2mmしか増えず、トンネルは全く安定していた。これよりこの時のFerner—Pacher曲線の勾配は $900\text{t}/10\text{m}\times 5\text{m}/2\text{mm}=9.0\text{t}/\text{mm}$ 程度であることが分る。これは $r=10\text{m}$, $E=1,160\text{kg}/\text{cm}^2$ 弾性地山中のトンネルに相当し、 $E=600\sim 4,000\text{kg}/\text{cm}^2$ 程度と想定されている地山をあまりゆるめていないことが分る(途中の切梁盛替時の計測からも $50\text{t}\sim 14\text{t}/2\text{m}\times 1\text{m}/1.9\text{mm}\approx 9\text{t}/\text{mm}$ となっている)。又、この事は2mmの変形を許容すれば900tの切梁支保は不要であったことを示している。但し施工途中で不安定になり、ゆるみが急激に進行しているかどうかの判断になる。

③トンネル支保の安全率の考え方

NATMの力学的説明は地山のそ性状態を考えているが、一方支保部材の考え方は許容応力度法の考え方を残しているの、このトンネルの様に数カ月もかかってベンチ掘削をしていると途中で安全率が1.0以下になることが予想されて来る。支保材の降伏後の挙動を考えて右図の様な安全率を考えるならば対策は大いに変って来る。このトンネルでは、ベンチを途中まで切下って来た時、点Aの状態になり、更に数ベンチ切下るならばアンカーボルトの耐力を超えてしまうとの議論が出され、補強工事をする事になった。又、許容変形量と云う様な考え方も一部で出されたが、引張材と圧縮材では降伏後の挙動は大幅に違い、特に四周

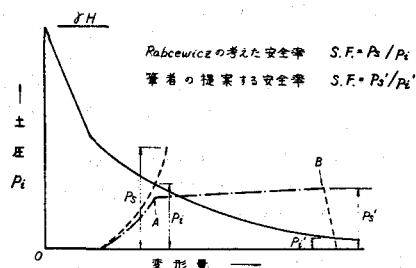
から拘束された圧縮部材の降伏後の挙動は鋼材などの引張材とも、三軸試験により求めた圧縮材ともちがうことに留意する必要がある。軟岩又は土砂中のトンネルに限って云えば、掘削後放置されているのではなく、キチンと支保されている地山であれば支保さえ破断又は圧壊しなければ、地山の許容変形量を考える必要は少しもない様である。

4. おわりに

日本にNATMが導入されて間もない時期の計画、施工であり設計上も施工上も問題が多かったが、何とか工事を完了出来た。従来のNATMの考え方といくつかの点で違って来たが、これは特異な形状と予想以上に悪い地質のためであったが、そのためかえて従来見すごされて来たいくつかの点に気づき、あらためることも出来た。

参考文献

1. L. V. Rabcewicz; Die Bedeutung der Messung im Hohlraumbau (I, II, III), Der Bauingieur Jul. Aug. 1972 and Oct. 1975.
2. 福島啓一; トンネル支保の安全率の考え方 土木学会年次学術講演会 1981. III—183
3. 染谷 他; 有間ダムのトンネル式洪水吐の施工 土木施工 1981. 9



(44) INCLINED SHAFT FOR SPILLWAY OF ARIMA ROCKFILL DAM

By Keiichi Fukushima
Tobishima Corporation

SUMMARY

Both right and left banks and shores at the location of Arima dam-site are very steep and the construction of the open channel spillway is so difficult that an inclined shaft type spillway was chosen.

The salient features of the spillway system with the inclined shaft are as follows;

Maximum discharge	720 m ³ /sec
Length of inclined tunnel section	102 m
Angle made by the tunnel with horizontal	47°
Length of subsequent horizontal tunnel section	355 m
Maximum cross-section of tunnel excavations	27M x 15M ellipse A ≈ 270m ²
Minimum cross-section of tunnel excavations	ø 8.70M A ≈ 70m ²
(Minimum applies the bottom part of the inclined shaft and all subsequent horizontal section)	

Rock conditions: Alternative strata of chert and slate, but these rocks had been badly shattered due to fault.

Tunnel driving was executed according to the New Austrian Tunnelling Method (NATM), but in our case some points were improved in comparison with ordinary NATM.

- (1) Owing to its very large cross-section, the ring closure time, which is normally recommended as less than one month from starting excavation of the part, was assumed to exceed six months, therefore we paid special attention to choose a type and dimensions of the supports.
- (2) To prevent from loosening of the surrounding ground, very low bench height (1.6m) was chosen. (Normally 4 - 5m is applied.)
- (3) Long bench length was chosen to enable effective tunnel excavation. Heavy bulldozer with ripper was adopted to excavate centre portion of the tunnel rapidly at first.

Above mentioned measures were taken in order to avoid loosening of the surrounding ground. We believe that very low bench height particularly contributed much to avoid ground loosening and to carry out effective work.

Thus, with improved NATM, we were able to excavate this large inclined tunnel successfully, safely and economically.