

(54) 大規模空洞工事における施工過程の影響

飛鳥建設(株)正会員 福島啓一

1. はじめに

トンネル工事においては、特に規模が大きくなるほど、施工の順序や断面分割の方法が重要なことは一般に広く認められている所であるが、具体的にその影響が明らかにされていて、力学的に好ましい断面分割法や施工順序が明らかになっているかと言うと、まだ各人の意見はあっても定説はないと言うのが現状ではなかろうか。以下に述べることも一部に実験等による裏づけを欠く想定も含んでいるが実際に起こる現象をより良く説明できると考えられるので、発表することにした。

2. 従来より分かっていること、分かっていること

地山を全然ゆるませず、変形もさせず掘削し、しかも掘削の直後に、間髪をいれずに、支保工を設置ししかもその支保工の剛性は無限大と見なし得るほど大きければ支保工は全土被りに相当する土圧を受けることは明らかである。しかしこんな施工は出来る筈はなく、一般にはトンネルの支保構造(一次支保、二次覆工も含めて)に働く土圧は全土被り圧より小さくなる。つまり地山アーチで土圧の大部分を分担するので、支保工はその残りを支えればよいと考えられる。Terzaghiはトンネル支保直上の土柱の重量の一部を両側の地山で支えると考えて土圧公式を導いた。この公式では暗黙のうちに支保工の設置は掘削より多少遅れているし、又、地山と支保工の間には多少間隙が残っているので、地山は鉛直圧力が最小になる所までさがれることを前提としている。在来のトンネル工法では、この仮定であまり不都合はなかった。しかし地山に密着して支持する吹付コンクリートやロックボルトが主流になってくるとこの仮定は全然成り立たなくなってしまう。この場合地山が完全弾塑性体として挙動するのならば、FEM等の数値計算でその挙動を前もって模擬することは出来るので、いろいろな断面分割法、施工順序について比較し、最も適した施工法を探し出すことも出来る。しかし現在用いられているFEMでは、掘削から支保設置までの短い時間内に生じる地山のゆるみ、強度劣化や体積膨張と、その後の再圧密～体積の減少や強度の回復～は取り扱っていないので、この効果が大きい場合は答えが違ってくる。

地山を弾塑性体と考え、掘削と同時に支保をすると考えると、変形量を大きくするほど支保工に働く荷重は減るという関係がある。しかし降伏した地山は急速に強度低下するので、変形量がある限界を越えると荷重は再び増えるとの説もあり、従って大きな変形をさせる事や地山をゆるめることはトンネル掘削にあたって極力避けるべきだとの信念は今なお根強い。又Rabcewiczは鉛直圧力により側壁部の地山がまず降伏し、そこが押出して来てトンネルの破壊に到ると述べているが、トンネルが上から落ちて来ることへの恐れは(Rabcewicz本人でさえも)抜きがたいものであり、多くのトンネル施工順序はこれらの考えを強く反映している。たとえばMassenbergトンネルでは側壁部を一問づつ大背より先に掘ると言う非能率的なことをしてまでも上半アーチの足元を早く支える事を心掛けていた。ここでは何よりも変形させてはいけない、極力掘削後の不安定な時間を短くして早く支保しなければならぬ、と考えられているのは鉛直圧力についてであり、鉛直方向の変位についてである。その傾向の更にはっきりしているのはWaldeck(図1)及び今市地下発電所(図2)の場合である。

Waldeck発電所の断面分割で留意されているのは次の点である。

○隅角部の応力集中を避けるため、半径3Mの丸みをつける。

○能率向上と発破により地山を緩めないことの2つの目的で各ベンチは中央部を大規模な発破で掘削し、周壁に近いところはスムーズプラスチングや空孔を用いた制御発破を用いて掘削する。

○既設の上半アーチの荷重を早く支えるように、側壁部は3Mづつ掘削し、直ちに支保(吹付コンクリートとアンカー)を施工する。

この空洞で当初は図1 aの様な断面分割が予定されていた様であるが、実施は図1 bの様になった。報告論文では詳細な説明はされていない所もあるので、一部推定を交えて整理すると

①実験の複雑さを減らすため光弾性実験では全断面同時掘削とし、地質は均一及び断層ありの2種とした。

②FEMでは施工順序を考えたが、施工順序はその時点での計画によった。

③実施にあたってはFEM解析と多少断面分割や施工順序が変わったが、力学的には等価なものと考え、特に再検討はしなかった。

しかし、大背の幅を広くしたことはかなり力学的に意味があることではないかと筆者は考えている。今市発電所でもほぼ同じ様な傾向である(図2)。

①当初は1ベンチ約7.5m づつ切り下がるものとしてFEM計算した。(図2 a) 計算回数を減らす意図もあったので、必ずしも7.0M~8.0Mのベンチで掘削する計画ではなかったと思われる。

②実施計画に当たり能率向上のため大背部分のみを3~3.5Mベンチで2段切り下がった後、残った側壁部(巾2.5M~3.0M)

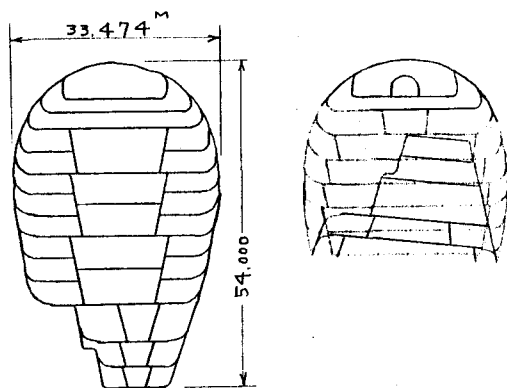
を制御発破で掘削し、直ちに支保することにした。(図2 b)

③実施してみると大背部分を高さ6M掘削後はしばらくの間、無支保のままであり、変形が大きくなり過ぎるので、途中より大背部分を3M切り下り後直ちに側壁部の掘削、支保をすることに変更した。(図2 c EL 473.0M以下)

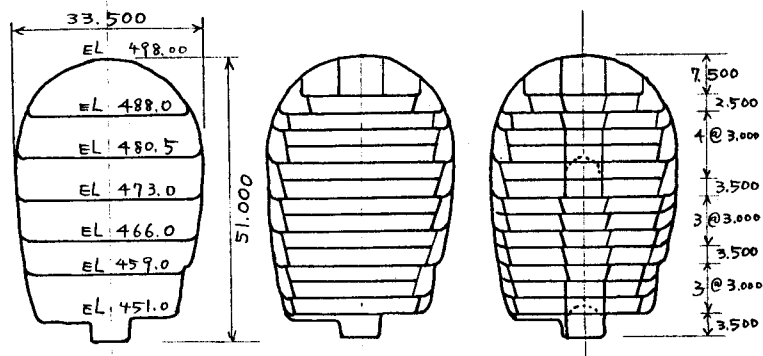
この両発電所の断面分割と施工順序をみると、鉛直荷重を主に考え、アーチの脚部を掘ってから支保をするまでの時間を極力短くして、アーチの足もとの沈下を防ぐことを主に考えて、水平方向の移動変位についてはあまり深く考えていない様に思われる。

3. 提案する施工法とその根拠

一軸応力下では岩石は一定値以上の応力(降伏応力又は破壊強度)又はひずみ(限界ひずみ)を受けると破壊したり、又は破壊しないまでも強度や弾性率が急激に小さくなったりする。しかし、3軸応力状態では岩石と言えども必ずしも降伏後強度低下(ぜい性破壊)せず、切線弾性係数が小さくなる(延性降伏)だけの場合もある。ぜい性と延性の区分は茂木によればほぼ 軸差応力 $\geq 3.4 \times$ 拘束応力 になるという。(岩質により多少の差がある)。今掘削後の、まだ支保工を設置してない状態(切羽が解放されているので、球形空洞で近似した)と十分な強度及びたわみ性の支保を設置した後の、切羽からかなり離れた状態との、地山内の応力分布を示せば図3のようになる。



(a) 当初計画 (b) 実施
図1 Waldeck地下発電所



(a) FEM計算 (b) 実施計画 (c) 実施
図2 今市発電所の断面分割

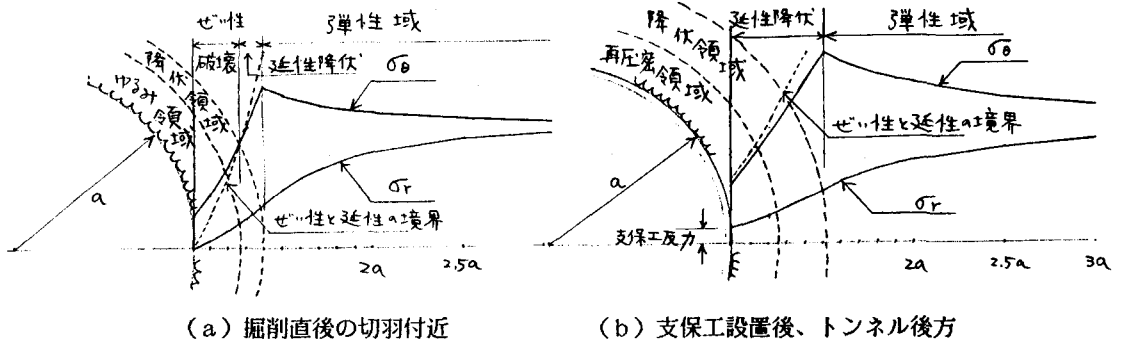


図3 地山内の応力分布

この図に拘束圧力 σ_r との関係でぜい性と延性を区分する応力を記入し、 σ_t と比べると、どこまでがぜい性破壊をするかが分かる。

十分な拘束圧力を与えるだけの剛性と強度の支保を設けた後の、切羽から離れることによる変形や、岩石のクリープによる変形の進行は延性降伏となる。この場合はぜい性破壊にならない範囲で、変形を許すほど荷重は小さくなる。

これにより掘削後、支保はなるべく早く施工し、その強度は延性降伏をさせるのに十分なだけの拘束圧力を与える事のできる大きさとする。変形は荷重が限界拘束圧力近くまで低下するまで許すことが推しよされる。言い替えれば支保設置前の変形はなるべく小さくすること。支保施工後の変形は必要内空がとれる限り、大きくしても差し支えない。(例外はある)。

分割施工する場合は、吹付コンクリートを主体とした支保と、これにアンカーボルトを併用した場合とでは、次の段階の掘削をした時の、内空反力の分布や、ゆるみ領域の広がりが違う(図4)。又ボルトにはプレストレスを導入しておく方が一層有効に働く。

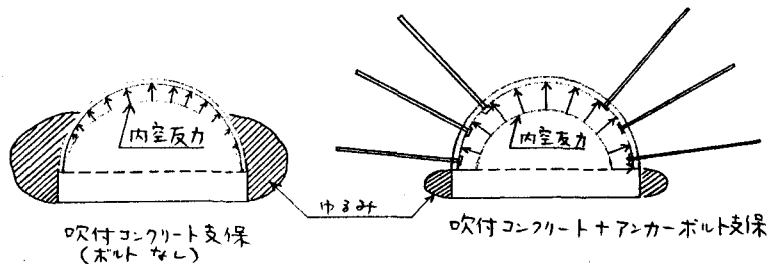


図4 支保形式と内空反力及ゆるみ範囲

ベンチ切り下がりにおいて、従来はアーチ脚部の沈下防止のため短い区間を掘った後なるべく早く吹付けコンクリートとアンカーボルトを施工する様すめられていた。一方、施工能率からベンチ高さは割に大きくとられて来た。こうすると側壁部の地山がぜい性破壊し、つまりゆるんで来る。側壁部地山の緩んだ部分は支保設置後再び圧密されるが、その時Marstonの言う突出形管渠と同じ状態になり、アーチ部には強い鉛直荷重を受けるようになる(図5右)。これを避けるためにはベンチ高さはなるべく小さくして、その代わりに一回の施工延長を若干長くして、ゆるみ防止と能率向上を両立させるようにするとよい。

(図5左) この時側壁部のアンカーボルトも重要である。今、地山を完全弾性体と考え(つまり、ぜい性破壊やゆるみ、再圧密などを考えないで)施工順序を追って図2 a 空洞についてFEM計算した結果の一部を表1に示す。これを見ると、アーチ天端の沈下は第一段階ではほぼ100%起こってしまい、ベンチ切り下がりを行っても殆ど進行しない(かえって減る)。一方側壁の押し出しはベンチ切り下がりに伴って進行して行く。一方、実施した結果は、アーチ部の沈下もベンチ掘削の進行に伴って増えて行っている(図6)。これは地山のゆるみと再圧密を考えなければ説明出来ない。

5. まとめ

FEM計算等によると大空洞も小断面トンネルも挙動に大した違いはないが、実際には大きな違いがある。

これはゆるみと再圧密を考
えることで今までの弾塑性
計算では分からなかったこ
とがほぼ説明できる様にな
った。又より良い施工法に
ついての手掛かりも得られ
た。

参考文献

1. L.V.Rabcewicz,K.Sattler;Die Neue österreichische Tunnelbauweise, Der Bauingenieur,1965.8
2. 御牧陽一、他：今市地下発電所の施工と空洞周辺岩盤の挙動について 電力土木1983.7
3. Willi Pulg : Pumpspeicherwerk Waldeck II Ausbrucharbeiten---Kavern und Schragstollen,Der Bauingenieur 1973.2
4. 茂木清夫 : Pressure Dependence of Rock Strength and Transition from Brittle Fracture to Ductile Flow, Bull. of the Earthquake Reserch Institute Vol 44,1966
5. 福島啓一 : Fenner-Pacher 曲線についての考察 (その1) (その2) 土木学会岩盤力学シンポジウム 1983,1985

表一 掘削順序による変位の進行

掘削ステージ	天端沈下	側壁押し出し
1	15mm	4mm
2	15	9
3	15	11
4	15	15
5	14	18
6	14	20

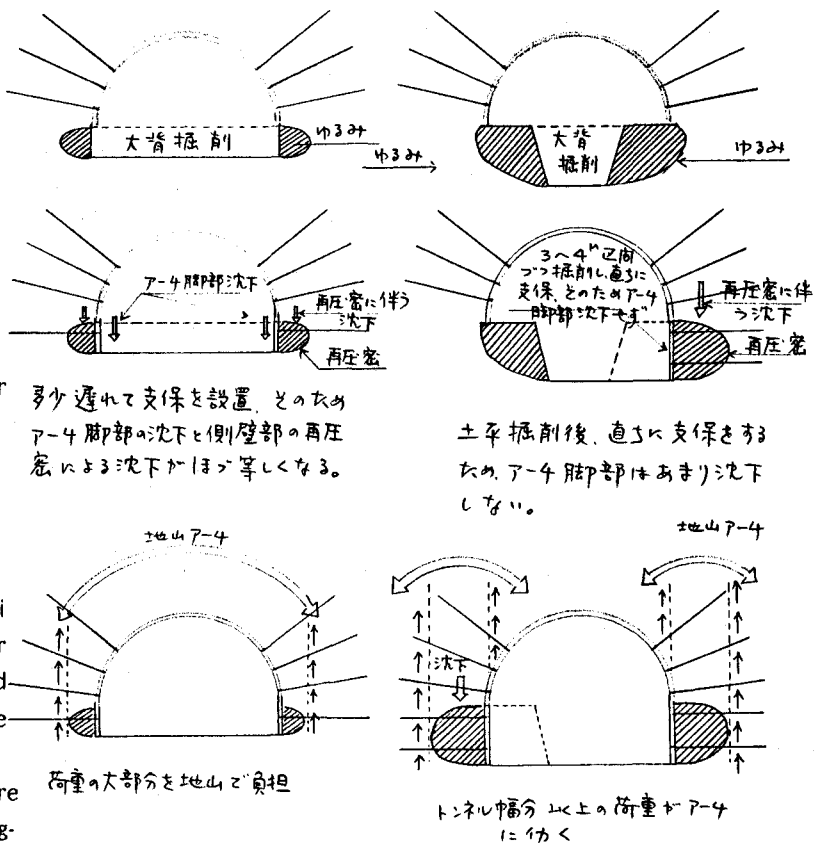


図5 断面分割・施工順序の違いによる地山の挙動

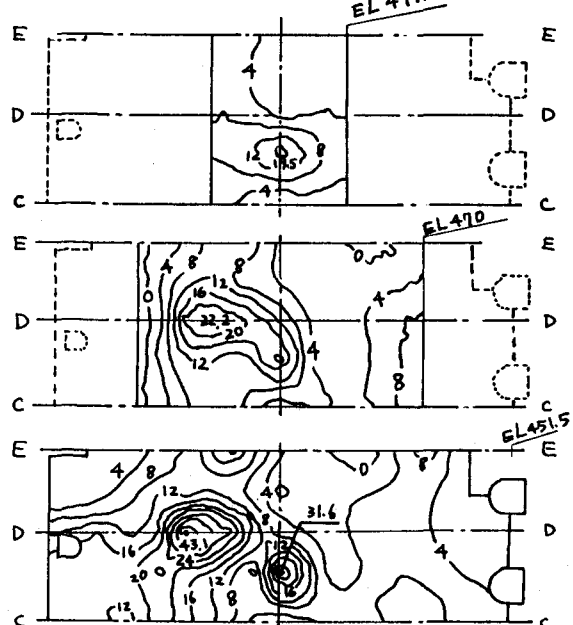


図6 今市発電所壁面押し出しの進行 (mm)

(54) Influence of the Working Sequence for the Large Cavern

Tobishima Const.Co. Keiichi Fukushima

It is well known that the working sequence influences on the stress, strain and deformation of a tunnel or a cavern. But it is known only qualitative, not quantitatively.

Using FEM computation and elastic-perfectly-plastic behaviour of rock, shotcrete and etc., we can compute stress, strain and deformation of tunnels, but sometimes its result can not get good coincidence to the real tunnel behaviour, specially in big cavern.

So, the author introduced the loosening of the ground while the tunnel was excavated and had not yet supported, and recompaction of that portion of ground after the supports were set.

Whether the rocks break down brittlely and come loose or flow ductilely and keep their strength is distinguished if they have a sufficient confining pressure or not.

These loosened rock is recompacted after lining has been set, and these behaviour of ground works like a earth pressure acting on the rigid or flexible pipe culvert embeded in the embankment, discussed by A.Marston.

So, according to the process of the bench excavation, the lining arch receive more and more ground pressure on the contrary to the conventional FEM computation results.

The author also propose a better excavating sequence which can avoid these stress concentration on the lining arch and can get favour stress rearrangements.