

NATMの特色を生かしたトンネルの断面分割

Subdivide of tunnel face for the benefit of the NATM

福島啓一

Keiichi FUKUSHIMA

Large size tunnels or cavities cannot be excavated their full face in one step. Therefore in ordinary case, they are excavated by subdividing into some sections, for example, top heading, benches, or sidewall pilots and so on.

There are types of the order to excavate in these subdivided sections. (1)upward process: first excavate and line lower parts of the section and go up to the roof step by step. (2)downward process: first excavate and support (and/or line) top heading and go down to the bottom step by step. (3)Mix of them and others.

This paper puts emphasis on the profit of the NATM which enable downward process and, propose the modification of the FEM calculating to demonstrate these profits.

1. はじめに

大きな断面のトンネルや地下空洞を掘るときは、いくつかに分けて掘るのが普通である。その理由は(1)施工上の都合によるもの、(2)支保工の寸法によるもの、(3)切羽の安定によるもの、(4)水抜き、換気、地質調査などのために導坑を先に掘る必要があるため、(5)その他 である。実際の決定にはその中のいくつかの理由が重複している。断面の分割法や施工順序は、施工機械の選定や施工能率に関係するのみならず、施工中、完成後のトンネルの力学的安定にも大に関係するが、後者について従来あまり研究されていない。

断面分割・施工順序には大きく分けて、(1)下の部分から掘り、下から巻立てをして行く工法と、(2)上から支保をしながら掘り下がる工法、(3)上から最終巻立てをしながら掘り下がる方法、(4)このどれかの組み合わせ、その他がある。経験的には地質が悪いときは、側壁導坑先進などの下から固めて行く工法の方が一般に安全確実と考えられてきた。膨張性のある地山では、上半先進で早く断面を閉合する方がよいと判断されることもある。

しかし一般には上半先進工法で掘削して巻立てアーチが沈下し、縫い返しを行った例も多く、上半先進は土圧があまりないと判断される場合にのみ採用する工法だと考えられている。

支保方式が木製支柱式支保、H鋼アーチ式からNATMへと変化してきたのにつれて、断面分割や施工順序を選定する基準も変わってくるべきであると考えられるので、施工上、力学上の両面から考察してみたい。

2. 施工上からの断面分割

施工上からは掘削断面の大きさの上限は、削岩ジャンボーや吹付け機などの施工可能高さに制限され、下

* 正会員 住鉄コンサルタント株式会社 東京支店

限は施工機械が走行・作業が出来る幅と高さにより制限される。一般に大型の機械を使用するほど能率がよいので、長大トンネルでは入手できる範囲で大きな機械を使用する計画を立て、短小のトンネルでは手持ち機械の転用などを重視した計画を立てることが多い。現在、新幹線の複線トンネル程度までは1回で掘削できる削岩ジャンボーや吹付け機が市販されている。幅についてはどんなに広くても機械を移動することで対処できる。

これらより背の高い地下空洞については上半を先ず掘り、次いでベンチ掘削する工法を採用することが多い。上から切り下がる工法では機械の走行・稼働盤は地山そのものであり、排水を良くすれば一般に特別の対策を要しない。まれに路盤を購入材で作る必要がある。重い、大型機械でも稼働できる。幅の広いトンネルでは全幅を一回に掘削せずに、左右に分けて掘る場合と、中央部を先ず掘り側壁部を後で掘る場合とある。これには分けた切羽間の距離を小さく採る場合と、数10m以上もとる場合、分割した断面間の境界にはH鋼や吹付けコンクリートの支保工を設ける場合と無支保の場合とある。中央部を先に掘る工法はアーチの脚許をすくわないと言う点で、沈下防止にはよいが、側壁支保の施工が遅れる欠点があり、水平から押し出す地山では好ましくない。

下から掘り、巻立てをして行く工法では、地山のゆるみを最小限に抑えるために、出来るだけ小さい側壁導坑を掘るので、施工能率は悪い。もっとも崩落・肌落ちの危険が高く、直ちに支保をする必要のある天端掘削を何回もする必要がある、その度に後で撤去する必要のある支保をすると言う余分の作業がある。上半部に重い大型の機械を採用して能率良く施工しようとする丈夫な足場を作る必要がある。

3. 断面分割と力学的挙動

3. 1 経過時間と強度・ひずみの進行の関係

掘削直後はどうしてもある時間は支保なしのままである。この間は最も応力条件が厳しくゆるみや崩壊が起こるので、断面分割の一番の意義はこの時間を短くすることにある。時間 t と強度 σ の関係は $\sigma^P t = \text{一定}$ で表される。ここに P は材料定数で、コンクリートでは70位であるが、軟岩・土砂では3～5位まで低下するようである。つまり載荷持続時間が10分と100分では強度は半分くらいになる。崩壊する前には強度の低下、ゆるみが始まるので、有害なゆるみを防ぎ、崩壊する前に支保を施工できるようにするのは断面分割の重要な役割である。

3. 2 地山のゆるみを小さくする断面分割

Terzaghiは地山がゆるむのは支保工と地山の間にすき間があることによるとして、ゆるみ荷重の計算式及び地山分類毎の荷重表を導いた。これによるとゆるみはトンネル幅 B に比例する。ボルト支保など地山に密着した支保ではこれは成り立たない。地山がゆるみ強度低下するのは先ずは無支保区間であり、この区間を狭くすることが大切である、として、Rabcewicz¹⁾は中位に塊状の地山に対して次のような値を示している。

表-1 掘削・支保工法により変わるゆるみ高さ(after L. v. Rabcewicz)

掘削・支保方式		ゆるみ荷重高さ H_1
木製支保工	オーストリア工法	$H_1 = B$
鋼アーチ 支保工	上半先進・ベンチ掘削、不十分なくさび締め	$H_1 = 0.5B$
	全断面掘削、注意深くなくさび締めと矢板施工	$H_1 = t$
ボルト支保工		$H_1 = 0.5t$

ここに B :トンネル幅、 t :1回掘削進行長

この意味ではボルト工法やNATMでは一回掘削の長さ t を小さくすることは効果はあるが、断面を左右に分割する意義はほとんど無いことになる。実際には切羽の高さ h 、さね残し等の補助工法も影響する。

3. 3 従来の断面分割とNATMの断面分割の差

従来の支保工は木製であれ、H鋼製であれ、それ自身で完結した構造物として強度を持ち土圧に抵抗する

と考えられている。土木構造物の安定の三原則(沈下、転倒、破壊に耐える)を考えると、施工は下から上へと進めることは自明のことである。この原理をトンネルに適用すれば、側壁導坑先進などの工法がもっとも安全確実な工法となる。極端に土圧が大きい場合はインバート部分を先ず完成し、順次上の方へと施工していった例もある。しかしこの工法はいかにとも能率が悪く、施工中は危険である。一方上から下へと掘り下がる時は、支柱、アーチの脚許を掘り、下に継ぎ足すなどの不安定な作業があり、土圧が小さいとき以外は採用しがたいと考えられる。

NATMではボルト、吹付けコンクリートなどで補強された地山そのものが支保であり、足元をすくうと言うことがないので支保の沈下、地山のゆるみが大幅に減る。吹付けコンクリートは円筒シェルとしての強度があり、断面図から考えるほど宙吊り状態にはならない。従って原則として上から下へと掘り進む工法がとられる。この場合は、力学的にも安定で、施工能率的にも何ら問題はない。

また従来の支柱式支保では巻立てコンクリートは支柱の撤去と平行して施工されるので、断面分割の途中で用いられる支柱には強度部材としての役割が巻立て寸前までであったが、現在では移動型枠を用い、支柱、中壁などはすべて掘削終了時、巻立て準備前に撤去するので、支保の最終強度には貢献しない。

3. 4 導坑の意義

換気、ずり出し、湧水対策、地質調査、切羽を増やす(途中から切り上がり)、山はね防止(エネルギー解放)等の目的で導坑を掘る例がある。NATMで中央導坑を掘ると、この他に「(1)大型の切羽ボルトと同じ働きをして、切羽の押出しを防止できる。切羽の安定が良くなる。(2)へそ残し等比べて、切羽近くでボルトを打つのに邪魔にならない」などの効果がある。TBMを使用して導坑を掘る場合も増えてきて、この導坑からボルトを打つ例もあるが、施工能率を考えると、切り上げ後直ちに打つ方が効果は変わらず、施工能率は良いと考えられる。

3. 5 切羽の後で起きる現象

矢板を使う掘削工法では地山と支保の間にはすき間、ゆるんだ地山などのクッションがあり、トンネル直上とその両側との沈下量の差による後荷は小さかったが、地山と密着した吹付けコンクリート支保では沈下量の差によりnegative frictionが働き、土圧が増加する例が多い。断面分割は施工に伴ってゆるむ範囲を変える作用があるのでnegative frictionが不利な方向に働かないように分割する必要がある。

4. 断面分割の実際

4. 1 上から掘る工法と下から掘る工法

NATMの支保は地山と吹付けコンクリートと、この二つを結びつけるボルトから成り立っている。従って下半をトンネル幅一杯まで掘っても、支保工の脚許を掘って宙に浮かしたことになる。その上に吹付けコンクリートは円筒シェルとしてもかなりの剛性と強度を持っている。Wallbeamで連結したH鋼アーチ支保に比べても沈下量は小さい。従ってNATMでは上から下へ切り下がる工法が施工的に能率が良いだけでなく、力学的にも合理的であり、理にかなっている。

理論は分かっても上から下へと掘り進むのは気分的に怖いものである。そのため中段に導坑を掘り、コンクリートで埋めてしまってアーチの基礎を作る工法が考案された例もある。Tarbellaダム転流トンネル、青函トンネル海底部などに例がある(図1参照)。NATMがこれほど普及した現在ではこのような工法はあまり必要ないと考えられる。

4. 2 地山アーチの有効スパン

無支保の区間でのゆるみは放置時間と地山アーチの有効スパンの両者に比例すると考えられる。有効スパンsについては定説はないが1回掘削長さt+切羽高さhとして良い。切羽の有効高さhを減らすには中段にベンチをつける、傾斜させる、さね残し、切羽ボルトなどの対策が有効である。

天端にボルトが設計してあると、このボルトを打つために中段ベンチの高さが低いところにくる。中段から天端まで、ボルトの長さ+削岩機の長さ+ガイドセルの駆動部の長さ+余裕の高さが要る(図2)。これが

高いと、切羽の安定が悪くなる。支保工(ボルト)を多くして、地山のゆるみを助長するのでは効果はない。

最近の施工例では中段ベンチ方式で、上半だけH鋼支保がある設計に対して、実際には(1)ベンチの高さを中央部だけ約1m下げた例と、(2)H支保を施工業者の負担で約1m伸ばして、中段ベンチ全体を約1m下げた例とがある(図3)。この理由はボルト打設の都合と、地山が悪くなって上半先進に切り替えたとき、全断面工法で使っている施工機械がそのまま使えるようにと言うことであった。天端ボルトを無くす、または後打ちにして中段ベンチの位置を天端から3m位にすれば、上半先進に変更しないでそのまま施工できると考えられる。

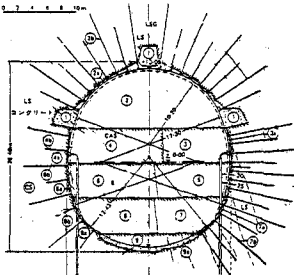


図1 中段導坑の例(Tarbela)

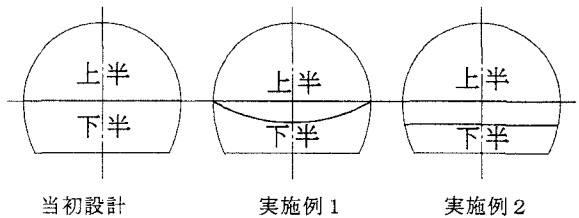


図3 中段補助ベンチの位置(設計と実施例)

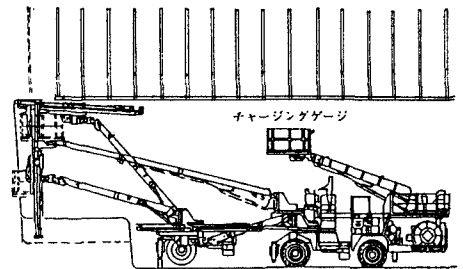
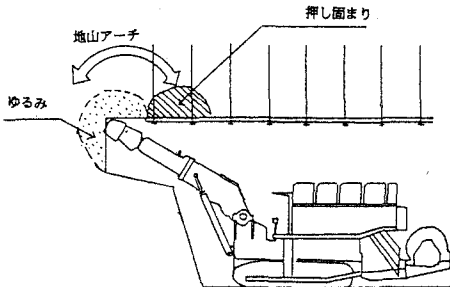


図2 中段ベンチとゆるみ防止(切羽縦断面図)

4. 3 切羽幅の分割

大きなトンネルでは、上半・下半とも切羽を2～3に分けると、施工量が半分になり、無支保のままの放置時間も減るので、地山のゆるみが減る。ベンチ掘削では大背(中央部)を先行して掘削し、土半(側壁部)を後で掘削する方式と、左右に分割する方式がある。中央に斜路をつけて、上半とベンチを平行して掘削する方式も力学的効果は大背先行とほぼ同じになる。大背先行はアーチの沈下防止を主眼にしているようであるが、negative frictionを増やし、逆効果になる。

トンネル全体を左右に分けて掘る時、境界部にH鋼及び吹付けコンクリートで支保をする中壁方式という工法もあるが、中壁の支持力は座屈強度で決まり、計算してみると約3t位とボルト1本分(10～20t)もない。またアーチの中央を支持する必要があるのかどうかも疑問である。施工能率は下がるので、掘削から支保までの時間短縮の効果は望めない。後で撤去する支保が増え、工費、工期とも増大するので、望ましい工法とは考えられない。

狭い部分を掘って、すぐ支保をすることはゆるみ防止にとり重要である。しかし例えば次に掘削するところはゆるんでも良い。トンネルの周辺に将来も残るところをゆるめないようにすることが大事である。出来るだけ地山に荷重を負担させて、支保部材の強度は安全のために残しておく。ゆるみ防止も、力学的効果があり能率も損なわない方向で考えるべきである。

4. 4 アーチ、側壁の足元掘削

H鋼支保は1本1本の強度はあるが、トンネル長さ方向に連結体としての強度はほとんど無い。従ってベンチ掘削のとき、かなり沈下する。ベルギー工法のように上半に最終巻立てを施工してからベンチを掘る場合でも、地山と巻立てが別に働き沈下する。吹付けコンクリート+ボルト+地山=支保のNATM支保では、トンネル長さ方向にシェルとしての強度があり、ベンチ掘削でもそれほど沈下しない。

4. 5 仮支保、仮インバート、ボルトの役割

支保工の意義は次のように考えられる。一つでいくつかを兼ねる場合もある。

- 1) 完成後も有効なもの——吹付けコンクリート、H鋼アーチ、ロックボルト
- 2) 施工中のゆるみ防止に有効なもの——パイプルーフ、斜めボルト、切羽ボルトなど
- 3) 巻立てをするまで有効なもの——セントル、膜板方式で巻立てる場合の支柱
- 4) 次の施工段階まで有効なもの——壁梁(wallbeam)、ボルト、仮インバート、中壁

仮インバートの効果と上半からベンチ掘削までの時間差・離れを小さくするミニベンチの効果はどちらが優れているかはかなり微妙である。

小さい断面ですぐ閉合する場合はボルトは要らない。ボルトの役割の大部分は吹付けコンクリートが閉合するまでの、施工途中の安定にある。地下発電所などの背の高い空洞では仮インバートよりも側壁にボルトを増やした方が有効である。

4. 6 トンネルの安全

トンネルの破壊は地山が塑性状態になっても、支保・巻立てが健全な状態であれば起こらない。終局状態、限界状態設計の考え方で言えば、保有耐力は支保工・巻立てでとる。地山はばらつきが多く、残留保有耐力にはあまり期待出来ない。塑性状態の計算は、それにより作用土圧が減ることを明らかに出来ることにある。有限要素法でいろいろの計算が出来るのはよいが、例えば地山が塑性状態になることを計算出来ても、その解釈を誤れば逆効果である。

5. FEMの改善²⁾³⁾

トンネルの断面分割の検討にFEM計算を用いる例は多い。しかし従来の計算法では必ずしも現場で起こる実状を反映していないので、その答えだけで判断するのは危険である。計算法の改善案については別に発表したので、要点だけを上げておく。

- (1) 軸対称計算によりトンネル長さ方向の地山アーチの効果等を求め、これに相当する圧力を2次元FEM計算に内空面ではなく、地山内に分布した圧力として与える。(2) 地山の降伏条件を脆性域から、負のダイレタンシーが働く所まで含めた曲線にする。(3) ゆるみ・再圧密に伴う強度、体積等の地山の変化を取り入れる。(4) 載荷時間が長いと強度が落ちる、変形が進むなどの時間効果を取り入れる。(5) 吹付けコンクリートの3次元シェル効果を取り入れた計算をする。

6. まとめ

支保や施工法が変わっても断面分割の原理はあまり変わらない筈である。しかし表面に現れた形は大きく変わってくる。断面分割の要は施工性と力学的要求を両立させることにある。今後施工法や施工機械が変わってもここで述べた考え方の方向はあまり変わらないと考えるものである。

7. 参考文献

- 1) L.v.Rabczewicz: Effect of modern constructional methods on tunnel design, Water Power, Dec. 1955 & Jan. 1956
- 2) 福島啓一、江崎哲郎：施工過程を考えたトンネル掘削のFEM解析、第28回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp85~91, 1997, 1
- 3) 福島啓一：地下空洞の安定に関する施工の影響、トンネルと地下, 1999, 1(投稿中)