

N A T Mの可能性と展開

Flexibility and further development of the NATM

福島啓一¹⁾ 大室辰夫²⁾

Keiichi FUKUSHIMA, Tatsuo OOMURO

Since the NATM introduced into Japan, nearly 30 years have passed, and it diffused overall fields of the tunnelling in Japan. And detail technics of its execution progressed greatly, but basical flexibility of its, possibility of its has not been developed sufficiently. We try to make clear its character and expand its flexibility and applicable fields. Here shows some examples to develop the new possibilities of the NATM.

Key Words : tunnel, NATM, shape of the tunnel, slope stability

N A T Mが日本に導入されてから約30年が過ぎ、全国あまねく普及した。しかしこれで技術開発の余地がなくなった訳ではない。この工法の持つ潜在能力はまだまだ大きいので、これを引き出し、今後もさらに発展させることができるし、必要である。

N A T M支保の特色は

- 1)地山アーチを利用する。支保の役割は土圧を支えるのではなく、地山を補強することにある。
- 2)支保は延長方向につながっている。3次元構造である。
- 3)地山と一体になっていて、従来工法のように支保だけで荷重を下から支えているのではないので、掘削は上から下へ進行してよい。(H鋼支保や吹付けコンクリートの下は掘っても、ボルトで補強した地山の下は掘らないから)

これらの特色を良く理解すれば、いろいろ自由な発想が出来、新しい応用分野や面白い施工法を考えつることができる。

1. 断面形状の自由性

現在トンネルの形は円を組み合わせた馬蹄形というのが相場である。それより前は側壁が直のトンネルも多かった(小さな水路トンネル、鉄道単線トンネル、道路トンネル)が、土圧が大きいときは具合が悪く、側壁にも曲線を入れて馬蹄形にされた。N A T Mが導入されてから、インバートの重要性が強調され、さらに側壁とインバートの間は鋭角に接合するのではなく、曲線を入れて、応力の流れを滑らかにするのがよいとされた。しかし従来の考えの内面形状から変更することにはなかなか抵抗があり、妥協の産物として、最小限の、半径1mの曲線が入れられてきた。しかし半径8m程度の側壁からいきなり半径1mの曲線に移り、さらに半径13~20mのインバートに移るのでは応力の流れが滑らかとはいかず、土圧が大きい場合には不都合があったようである¹⁾。(インバート端部と側壁脚部との接合部が圧縮破壊され、インバート端部は約10年間に最大370mm隆起し、盤膨れが発生した。……トンネルの構造上の弱点箇所であるインバートと側壁脚部の接合部に圧縮破壊が生じ、急激なインバート隆起に至っており、インバートはその機能を全く有していないと判断した)。最近日本道路公団の設計要領(1997年版)²⁾ではここに半径1.5mの曲線が入れられるようにな

-
- 1) 正会員 博士(工学) 住鉦コンサルタント(株)東京支店技師長
 - 2) 住鉦コンサルタント(株)東京支店 設計課長

った(これまでのトンネル脚部における変状実態を勘案し、長期安定性の向上のためにインバートすりつけ半径1000mmを1500mmに変更することとした³⁾)のはこのような背景に基づく進歩である。(日本鉄道建設公団のNATM設計施工指針⁴⁾では「断面力や応力が滑らかに伝達されるように配慮するとともに力学的機能を満足するように設計しなければならない。曲線の半径は1.0m程度を標準とする」となっていて1.5mの採用例もあるが、1mの採用例が多い)。出来ればもう少し大きな半径を入れる方がよいと考えられる。(そのためには歩道をあげる、側溝の形状を変える、側溝とインバートコンクリートを一体化するなど工夫が必要になるが、 $r=2.0\text{m}$ 程度は可能であろう)。円の組合せでなく、楕円を採り入れることも考えてよい。

一方少しも不都合がないはずなのに、避けられている古い習慣もある。偏平率という考えもその一つで、高さ/幅比が小さすぎると不都合ということになっている。これが本当なら仮インバートを閉合しての上半先進工法は誠に危険ということになる。幅の割りに背が高い地下発電所などで側壁の安定に苦勞することは多いが、そんなことはこの理屈ではあり得ないことになる。その地下発電所も最初の掘削断面は偏平な形であり、この状態の方がもっと危険ということになる筈だが、実際にはそう言うことはない。交通量が増え、幅の広いトンネルが要求される場合も増えているが、偏平率にとらわれて必要以上に背の高いトンネル形を選べば内空断面は相当の無駄になり、トンネル工事費は高くなる。

※トンネル標準示方書⁵⁾、道路トンネル技術基準⁶⁾などでは偏平率の規定はないが、建設省道路局の通達(H8.8.5)には道路協会トンネル構造検討委員会トンネル計画・設計分科会の検討結果として表-1のような大断面トンネルの標準的な組合せ例が示されている。(この内容はH14年版の道路トンネル技術指針(構造編)に取り入れられる予定という。)

表-1 断面区分検討

	標準断面	大断面Ⅰ	大断面Ⅱ
内空幅(m)	8.6～12.5程度	12.5～14.0程度	14.0～16.0程度
内空形状	一般的に 上半単芯円断面	一般的に 上半3芯円断面	一般的に 上半3芯円断面
内空縦横比	概ね0.6以上	概ね0.57以上	概ね0.57以上

注1)内空幅とはスプリングライン上での内空幅を云う。

偏平率が上記の数字より小さい場合には支保を大きくすることが求められている。

偏平なトンネルでは支保の天端部分に働く下側引張の曲げモーメントが大きくなり破壊することを心配しているようである。しかし測定してみると、天端には曲げモーメントはあまり働かないか、むしろ下側圧縮の曲げモーメントが働く場合が多い。内空変位の測定結果も天端沈下より側壁の押し出しの方が大きい。つまり一般に天端に働く垂直圧よりも側圧の方が大きい。まれに鉛直圧が卓越することがないわけではないが、その場合大抵施工中に支保全体がそのままの形で沈下し、天端で下面引張の変状が生じることはまずない。それより下面圧縮で圧裂剥がれ、または圧挫破壊することが多い。ひび割れが起こるのは2次覆工コンクリートと地山が点接触するためのことが多く、2次覆工の裏に緩衝材を入れると防止できる。

また支保+覆工に働く軸力 N 、曲げモーメント M による応力は $\sigma = N/A \pm M/Z$ で求められるが、ボルトで補強した地山は厚さが大きく、断面係数 Z は厚さの3乗に比例して増えるので、曲げモーメント M の影響はそれほど大きくならない。H鋼アーチ支保工や覆工コンクリートだけで地山を支えたときと同じに考える必要はない。NATMの場合、それほど偏平率を気にする必要はないと考える。

トンネルは左右対称でなければならぬと思うのも木製支保工時代の考えを引きずったものであろう。最近の道路は歩道を広くとる例が多く、それも片側だけにとることがある。上下2車線ずつのトンネルを2本並べて掘る場合も歩道が片側にしかつかない。このような場合左右対称な断面形を選ぶと内空断面にかなりの無駄がでる。左右非対称な断面を選べばこの無駄がかなり減る。

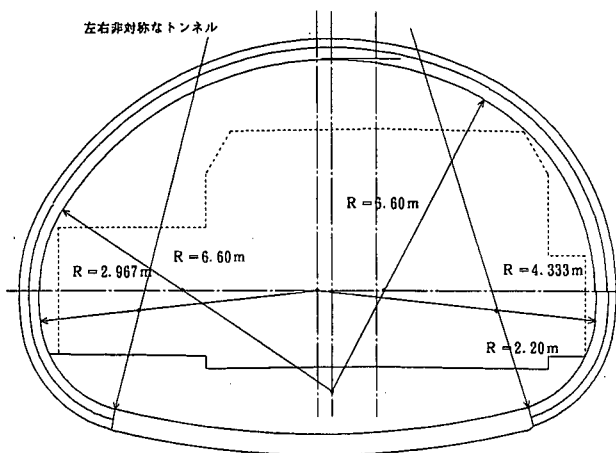


図-1 左右非対称のトンネル例

図1程度の左右非対称は力学的に何ら不都合は起こらないと考えられる。

二つのトンネルを並べてつくるとき、かつては2～3D(D:トンネル幅)以上離すべきだと云われた。しかしNATMになるとこの距離は縮まり、ついには2～3のトンネルが互いに接しているようなトンネルも掘られている。この場合の施工法として中央の側壁導坑を先に掘り、中央の側壁をつくった後、アーチを掘るという例が多かった。岩盤トンネルでは鷺羽山トンネルのように先に掘る方に後続トンネルの側壁分まで含むように広く掘るという工法がとられた例もある。土砂トンネルでは今も3本の側壁導坑を先進する眼鏡トンネルが多いが、工期、工費ともに無駄が多いので、改めるべきであろう。

2. 偏圧対策

かつての鉄道建設ではトンネルは高価であるので、山裾を縫って走りなるべくトンネルが短くなるように路線を選定された。そのため偏圧に悩まされるトンネルも多かったようである。今でもトンネル坑口はなるべく等高線に直角になるように付けるべきであるといわれ、示方書、マニュアルにもそう記載されている。あえて等高線に斜めにトンネルを取り付ける必要もないが、それほど避けるべきことであろうか。今でも鉄道や道路を山裾に沿って路線選定することは基本的には正しいことであり、そのように実施されている。しかしそのためにトンネルの前後に長大な切り取り法面が出現することが多い。かつての木製支保工や石積み、煉瓦積みないし無筋コンクリートの覆工は偏圧には弱かった。そこで偏圧を避けるために、等高線に斜めに坑口を付けないために、両切り取りになるところまで坑口を追い込むことにもなる。または大きな抱き擁壁

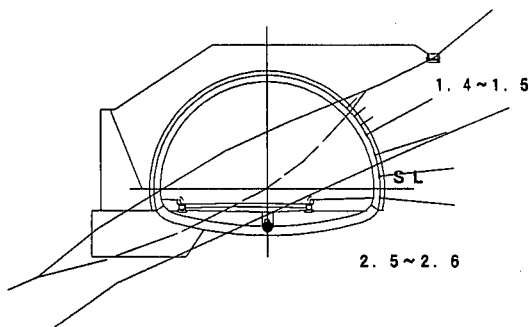


図2 抱き擁壁、押え盛土によるトンネル掘削

ボルトで補強した地山は石積み、煉瓦積み、あるいは無筋コンクリートの覆工に比べ許容変形量が大きいのでさらに有利である。必要とあればアンカーをさらに長くすることは容易である。

偏平なトンネルや左右非対象なトンネルで何か不都合が起きるのかどうかをはっきりさせるべきである。一番不都合が起きるのは内空面の曲率半径が急変することで、これは側壁とインバートの継ぎ目付近でひび割れなどが起きることで実証されている。その他の不都合については考えつかないし、起きたという報告も今のところない様である。土圧が非対称に働く、偏圧が働くトンネルは多いが、この場合左右対称な断面形を選ぶということは、力学的には非対称な断面を選んでいることであるが、偏圧がとくに大きい場合以外に不都合とは聞かない。施工中に至っては、片側半分を先に掘る中壁工法さえ時々採用されている。

をつくり、押さえ盛り土をしている。そのためには基礎杭を打つ必要もあり、無駄な工事費がかかり、長い工期を要し、将来の保守も難しいばかりでなく、自然破壊も多くなる。

しかし、地山そのものを補強し、地山を支持するNATMのトンネルはそんなに偏圧には弱くない。かつての覆工がせいぜい1m厚さくらいの石積み、60cm厚さくらいのコンクリートであったのに比べ、地山を補強したNATM支保は厚さが3～4mはあることを考

えてもこのことは容易に合点できるはずである。また

この様な NATM 支保の利点を活かすためには斜めに坑口を付けるのはもちろん、山裾を縫って走るときに長大斜面を作りながら切り取り工事をするのではなく、早めにトンネルにする方がよい。こうすれば場合によっては片側に地山がほとんどないトンネルが出来るわけであるが、更に積極的に片トンネルとも云うべき、片側には地山も支保工もないものをつくり、自然破壊を少なくすることを考えるべきであろう。この様な発

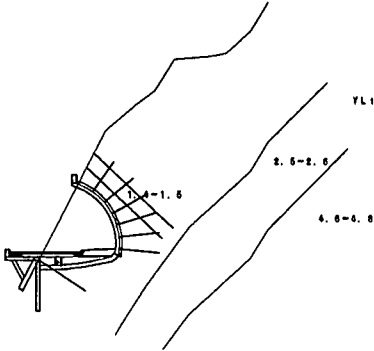


図3 片トンネルの例

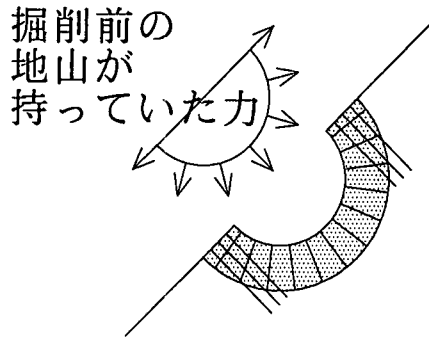


図4 片トンネルの釣り合い

想に立てば、実際に適用するにあたってはいろいろな変形が出来る。その一例を図に示す。

片トンネルの設計はどうすべきであるか。長大法面の防護にも相当量のアンカーが必要である。この場合に必要なのと同じ量のアンカー+切り取りしなかった土の重量分だけのアンカーが必要であろうか。その必要は全くない。

必要なアンカー量は、切り取ったトンネル断面が今まで抵抗していた力の量を知れば、それを置き換えるだけで充分である。岩盤の場合は掘削前に地山に働いている応力を測定することはそれほど難しいことではない。土砂の場合に測定は難しいが、極限強度を知りうるので、その分のアンカー力で設計してもそれほど無駄にはならないであろう。

別の考えでは、トンネル掘削前に法面に施工するアンカーで、閉合したトンネルの場合の切線方向力に相当する力を斜面直角に与えればよい。NATMの基本はロックボルトなどで補強した円環状の地山であるが、これが半分になったと考えれば、切断面の反力(アーチ反力)をアンカーで取ることができる。切線方向に働くアーチ反力がとれるようにアンカーを入れれば円形トンネルと同じになる。

経験論では、抱き擁壁と押え盛土で安全に施工した例(図2参照)も多いので、押え盛土の重量に相当する力を斜面に直角にアンカーで加えれば、斜面の安定は保てる。普通は 10 t/m^2 も加えればよい。押え盛土の効果をFEMで計算した例⁷⁾もあり、計算も可能である。もちろん施工中は実績・観察・計測結果を見て修正して行くべきである。

またはロックボルトで補強した領域を疑似擁壁ないし疑似アーチと考えて設計してもよい。

計画・施工に当たって注意すべき点は(1)インバートをつける、施工中はインバートを1間ごとに閉合する、インバートにもボルトを入れる、必要によりプレストレスを入れる。(2)計測は内空変位だけでなく、絶対変位を測る、斜面の動きも測るなどであろう。

現地盤の勾配が限界勾配に近い場合、地層の傾斜にほぼ一致している場合などでは切り取りすると斜面の長さは非常に大きくなる。この工法では土工量が減るだけでなく、アンカーの量も長大法面をつくるのに比べれば大きく減る。法面災害や雪崩の被害も減る。長大法面工事のように長い期間がかかり、その間に地山をゆるめ、雨水をしみこませ、風化を促進させることもない。1間掘削ごとに吹付けコンクリートで地山を防護し、アンカーを打設するので地山の動きを抑止できるし、植生などは元のままである。ただしトンネルを掘らなくても地送りや斜面崩壊があるようなところではさらに検討が必要である。また落石や雪崩防止のためにはトンネル形に覆いをつける必要が生じることもある。

3. 竹割り式坑口付け

坑口付近は被りが浅く、十分な地山アーチが働かないから、被りが $0.5D \sim 1.0D$ 位まではすこぶる危険で、インバートを閉じろ、支保工を大きくせよと云う規定・説明が各種示方書やマニュアルに見られる。(例え

ば道路トンネル技術指針⁶⁾では支保工の上の被りが2～3 mの所で坑口を付ける、被りがD～2 Dまでの区間は坑口部として、支保、2次覆工とも一般部より丈夫にするよう規定されている。その割には押さえ盛り土は殆どが被り2～3 mで設計される)。しかし坑口付近は被りが薄く、荷重も小さいので、もちろん地山自重のほか大型自動車が行き交う道路の下などを除いての話であるが、地山アーチは2 mもあれば十分である。むしろ坑口付近ではトンネル掘削により周辺地山をゆるめることがあるので、法面の危険性に注意しなければならぬ。

坑口の一形式として、覆工コンクリートを地山勾配に合わせて斜めに切る竹割り式があるが、これも施工時は法面を切り取って、坑口付けをしている。木製支保の場合は法面の外に支保を2～3基組み、遣らずを建てて縦断方向に将棋倒しになることを防ぎ、土俵を積んでこれらを安定させた後、地山内にトンネルを掘り始める。H鋼アーチ支保でも同じ方法が踏襲された。このため被りが2～3 mになるところまで法面を切り込んでから坑口付けをする習慣になった。しかしNATMでは被りがとれるところまで無理に坑口を追いつけたり、支保工の上に押さえ盛り土をする必要はない。NATMの支保は2次元構造物でなく、延長方向にもつながる、3次元構造になっているのが特色であるから、この特色を生かすべきである。

NATMでは法面全体を掘らず、トンネル断面内だけを掘る、竹割り式の坑口付けができる。この場合、法面の崩壊を防ぐために、法面を吹付けコンクリートやボルトで防護することは必要である。

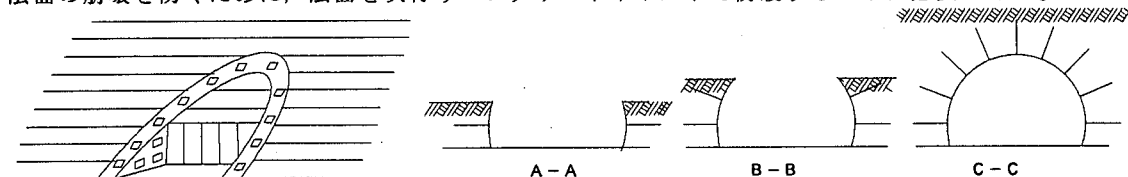


図-5 竹割り式坑口付け

同断面図(坑口側よりA-A, B-B, C-C)

NATMの支保は必ずしも左右の支保が天端でつながっていても良い。図5のA-A, B-Bの状態ではボルトと地山で疑似擁壁として働き、A～C断面が長手方向につながって一体にもなっている。坑口部は斜めに切った円筒シェルとして働く。

4. 張り出し栈橋

地山にアンカーを打設するというNATMの特色を明かり構造物に応用することもある。片側が急峻な山であれば、反対側は深い断崖と云うことが多い。ここに高い擁壁を築くには危険な作業と、高い工費を要する。アンカーを利用して、片栈橋を造れば、片トンネルと組み合わせて、路線選定の自由性はさらに増し、

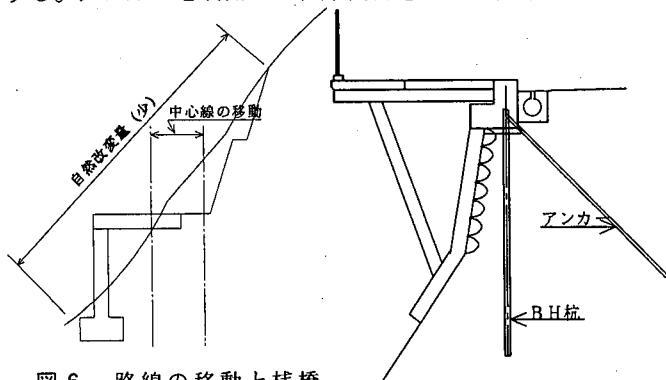


図6 路線の移動と栈橋併用により切土量を減らす、栈橋の利用例⁷⁾

図7 改善した片栈橋

より経済的な道路や鉄道を造ることが出来る。土工指針——のり面工・斜面安定工指針⁷⁾にも環境・景観対策の一つとして切土勾配を急にする、路線の移動と栈橋併用により切土量を減らすなどの案をあげている(図6参照)。普通栈橋の支持には鉛直な柱を用いるが、急勾配の傾斜地では柱の高さが莫大になり、清水の舞台のような大げさな構造物になる。アンカーと片持梁を用いるキャンティ工法などもあるが、これには曲げモーメントに耐える大きな梁が必要になる。ここに提案する片栈橋は急傾斜ののり面に倒立三角形の部材を取

り付けるので、のり面には圧縮力だけが働き(のり面は直角方向に働く圧縮力に対しては強い)、のり面と路面の交点には鉛直力と水平力が働くので、ここに杭とアンカーを用いる。部材には圧縮力と引張力が働き、曲げモーメントは殆どゼロなので比較的細い断面でよい。(図7は歩道に用いた例)

5. 圧力・変形制御

NATMの特色は地山の変形を許して、土圧を減らすことにありと考えている人が多い。間違いではないが、NATMは変形を制御して土圧を適正な値に保つというのがより正しい理解である。被りが深いトンネルではもちろん土圧を減らすことに主眼が置かれるが、被りが数mしかなく、地表には建物などがあって沈下を制限されるときは、土圧は小さいのだから、特にこれを減らす必要はなく、変形の制御に主眼が置かれる。変形を許すのでなく、出来るだけ減らす、場合によっては機械掘削により正確な形状に掘削し、同時に切羽の押し出しも防御し、プレキャスト部材(セグメントなど)を使い、これをジャッキで押し上げるなどして、変形をゼロ近くに保つこともできる。ブラインドシールドなどで、取込率を下げすぎると地表を押し上げることがある。これを適正に管理すると、沈下をほぼゼロにすることが出来るが、これと同じ事をより積極的に目指す。

NATMは吹付けコンクリートとボルトを使い支保とする工法ではなく、いろいろな材料を使って地山を制御・管理しながら、地下構造物を作る工法である。市街地のトンネルでは切羽密閉の掘削機とセグメントとジャッキを使い、地表沈下や変形を制御する工法へと発展させる必要がある。

6. 終わりに

NATMの設計で大切なことは支保の寸法や吹付けの厚さなどだけではなく、断面分割と施工順序、地山の挙動にあわせた施工などである。断面分割は切羽高さと、自立時間と施工時間の大小関係で決める。トンネル工事が完成した後で、支保工や地山内の応力分布が安定な状態になっていることが大事である。

さらにNATMはトンネル工法だけでなく、地山取扱い(処理、treatment)工法に拡張できる。疑似擁壁、テルアルメなども含むものに拡張できる。

ここに述べた工法はまた未開明の部分を含んでいるので、今後計算、実験、試験施工などを行って詳細を詰めていく必要がある。経済的で、長期にわたり安定で、保守作業も少なくすみ、自然環境を損なうことの小さい工法を確立してゆきたい。

参考文献

- 1) 高木敏雄：営業線トンネルの変状と対策 JR北海道函館本線 神居トンネル、トンネルと地下，1997.11
- 2) 日本道路公団：設計要領 第三集 トンネル，1997.10
- 3) 八木弘，大津敏郎，中野清人，江良嘉宏：設計要領第三集(トンネル)の改正概要，ハイウェイ技術，No.9,1997.12
- 3) 日本鉄道建設公団：NATM設計施工指針，1996
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書(山岳編)，1996
- 5) 日本道路協会：道路トンネル技術基準(構造編)，1992
- 6) 橋本正，張鋒，田村武：トンネル施工時の土圧測定と斜面崩壊事例，土と基礎，2002.8
- 7) 日本道路協会：道路土工——のり面工・斜面安定工指針，1999