

招待論文

トンネル支保構造物の設計思想

DESIGN CONCEPT OF TUNNEL SUPPORT STRUCTURE

今田 徹

Toru KONDA

フェロー会員 工博 東京都立大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒192-0397 八王子市南大沢1-1)**Key Words:** *tunnel, tunnel support structure, steel arch support, shotcrete, concrete lining, rockbolt, loosening pressure*

トンネル支保構造物の設計では、設計条件を把握することが難しく、また、用いられる支保工の作用機構が必ずしも明確になつてないため、経験的な手法や施工中の計測によって設計を確定していくなど特殊な方法が用いられる。従って、多くの場面で技術的な判断を迫られることになるが、判断の基礎はトンネルの安定や支保工の働き方に対する考え方と経験である。しかし、これらについては時代とともに変化し、また、現状においても統一的な考え方があるわけではない。本論文では、各支保工の特徴を検討し、各種の制約条件の中で各支保工を組み合わせて支保構造物を設計、選択するときの考え方と問題点を明らかにする。

1. はじめに

トンネルは地中に設けられる構造物であり、必要なものは地中における空間である。軟弱な地盤など特殊な場合を除けば山岳トンネルの場合、その空間を保持する構造の主体は、地山そのものであって、トンネルの設計施工において重要な判断が求められる支保構造物は地山の安定を助けるための補助手段である。従って、トンネルの工事中および完成後の挙動や安定性は地山の特性に本質的に支配される。

しかし、地山の特性を定量的、解析的に取り扱うことが出来る精度で把握することは、実用的に非常に困難であり、また、たとえ把握できたとしても、設計を確定できる適切な解析手法が確立されているとは言い難く、通常の構造物のような定量的な設計になじまない面を持っている。

従って、トンネルの設計には経験的な手法や掘削の状況をもとに必要な判断を加える特殊な手法あるいは考え方用いられてきた。しかし、トンネルの関係者にとっては馴染んだ方法も、他の分野から見ると非常にわかりにくいものと思われ、また、関係者の間でも考え方が必ずしも整理されているわけではないよう思われる。

トンネルの設計も地上の構造物のように解析的、定量的評価に基づいて行うことが望ましいことは云うまでもないことであるが、地質の空間的な構造の把握を含めて、地山の特性を定量的な取り扱いが出来る程度に把握することは、多くの努力が払われてはいるものの、まだ更に時間を要するものと考えられる。従って、当面、現行の

トンネル設計手法は用いざるを得ないものと考えられ、支保構造の考え方を整理し、トンネル設計の問題点あるいは妥当性をを明らかにしたい。

2. 支保構造物の設計方法の変遷

(1) 半理論式による設計

古代から近世までのトンネルは、多くが掘削しやすく、かつ、安定性が良く支保工を必要としないところに設けられ、殆どが素掘りであった。しかし、近代化による運河、鉄道などの交通路の発達は、必然的に地山の良好でないところにもトンネルを掘ることを求め、支保を必要とするトンネルの建設が多く行われるようになった。この段階における支保構造としては、仮設的には木材が使われ、石積み、煉瓦積みの構造によって恒久的な安定を確保するという手法が採られた。石積み、煉瓦積み構造では必然的にアーチ構造を探ることになり、このアーチの設計は、落盤ないし崩壊の経験から、落盤の可能性のある土塊の重量を予測して、アーチに荷重を載荷するという考え方で行われた。すなわち、トンネルの掘削により緩む領域を仮定する方法で、緩み荷重法というべきものである。

崩壊の可能性のある土塊の予測方法は崩壊形状の観察を基にするものから、グランドアーチの形成を土質力学的に検討するもの、および掘削面天端の変位と関連づけるものなど多くのものが提案された。

Kommerell¹⁾は、支保に作用する土塊の高さ h を支保の

変形と関連づけて、

$$h = \frac{100e}{\delta} \quad (1)$$

とし、緩み領域の形としては放物線などを仮定した。ここで、 e は支保の変位、 δ は緩み係数と呼ぶもので、% で示され、例えば、砂で 1 ~ 3%，軟岩で 8 ~ 12% としている。

Bierbaumer¹⁾ はトンネルの天端がくさび状に崩壊していくことから、支保に作用する荷重 W を式(2)で示している。

$$W = \frac{\gamma}{4} b^2 \cot \phi \quad (2)$$

ここで、 b : トンネルの幅、 γ : 地山の単位体積重量、 ϕ : 地山の内部摩擦角である。

このような考え方での支保に作用する荷重はトンネルの深さに無関係である。しかし、深いトンネルの場合は、側壁の押し出しや盤膨れなどの特殊な現象が生ずる。このような現象に対しては、緩み荷重に対し真の地圧 (genuine mountain pressure) が作用するという捉え方がされた。すなわち、トンネルの掘削によってトンネル周辺の地山に生じる応力が地山の強度を超えた場合には、過剰応力によって破壊が生じ、トンネルの周辺に応力が解放された領域が形成されるものと考え、この領域をトロンペータゾーン (trumpeter zone) と呼んだ。この領域の地山は降伏あるいは破壊されているので、荷重を支持する能力は無いものと見なし、支保はこの領域の土塊を支持する必要があると考えるのが普通であった。緩みの原因は異なるが、支保は土塊を支持するという考え方には変わりはない。トンネル安定の基本的な考え方には、原因は何であれ、荷重を支持するという考え方があり、この荷重に安全な支保構造を設計するということが行われた。

石積み、煉瓦巻き時代の支保構造はアーチ構造であるから、荷重の分布形状によって構造物の形が決まるという側面がある。荷重の分布形状によっては、通常のトンネル形状では、合力がアーチのミドルサードに收まらない場合がでてくることになる。

Kommerell²⁾ は、覆工は独立したアーチとして働くのではなく、側壁部の回転によって地山から反力を受ける構造として捉えている。すなわち、地山と覆工との相互作用を考慮するという考え方を持ち込まっている。単独のアーチと考えた場合は、覆工の形状が三角形状の不自然な形になることがある、地山の反力を考慮することに合理性を見いだしたものと思われる。

掘削断面の形状と覆工の形状とは同じである必要があり、覆工の設計上から合理的な形状と、周辺地山の安定

上望ましい形状と設計法によっては、常に一致することは限らず、重点をどちらかに置いた妥協が必要であることになる。

覆工に煉瓦が用いられる場合は、覆工の厚さは 3 枚巻き、5 枚巻きというように、その厚さは段階的に変化させることになる。覆工の厚さは連続的に変化させることではなく、段階的に変化させるのがコンクリートを用いるようになった今日でも慣例であるが、その原点になっていることが考えられる。

(2) 地山分類とそれに基づく設計

荷重を想定してそれに必要な支保構造を設計するという手法の場合は、いかにして合理的な荷重を想定するかが最も重要な問題となる。複雑に変化する地山を取り扱う場合、地山を定量的に評価することは極めて難しいことであり、観察などの比較的容易に得られる資料から地山を分類するという必要性が必然的に生じてくる。荷重を求める式として表現される場合でも、定数が含まれ、例えば Kommerell の式でも緩み係数 δ は地山ごとに推定せざるを得ない。

このようなことから理論的な考察から得た式を媒介として荷重を推定するよりも直接地山の状況と荷重とを結びつける方法に移っていくことになる。1946 年の Terzaghi の支保工に作用する土荷重表はこの種の地山分類の最初のものである。この土荷重表は鋼アーチ支保工の設計の際に想定すべきものとして与えられたものであり、支保工には一様にすなわち放物線や三角形ではなく矩形の上塊の重量が作用するものとしている。

Terzaghi³⁾ の荷重を鋼アーチ支保工に載荷すると独立したアーチとしては成り立たなくなる。このため Proctor&White⁴⁾ はブロッキングポイントで地山に支持された構造と考える設計手法を提案した。ブロッキングポイントでは鋼アーチ支保工はヒンジが設けられているものと考え、支保工の軸力およびブロッキングポイントに作用する荷重とバランスするための受動荷重が地山から与えられるということを仮定して支保工に生ずる応力を求める手法が提案されている。鋼アーチ支保工などのトンネル内間に設けられる支保構造物は、周辺地山に支持された構造物であり、周辺地山との力のやりとりによって安定を保つという概念が従来より強く意識されるようになった。

Terzaghi 以後種々の地山分類が提案されるようになつた。その主なものをあげると、

Lauffer (1958)

自立時間

Protodyakonov(1960)	圧縮強度
Deer(1964)	節理間隔 (RQD)
池田(1969)	弾性波
Wickham(1972)	総合評価(RSR)
Bieniawski(1973)	総合評価(RMR)
Barton(1974)	総合評価(Q)

などがある。

Lauffer の分類はトンネル切羽の自立性を基にした分類で、切羽の寸法と自立時間の関係を示す図中で区分し、それに対応する地質の条件を挙げている。土圧の計算方法とは直接の関連づけはされていない。

Protodyakonov の分類はグランドアーチを仮定したトンネルに作用する土圧の理論式の定数を与えたもので、岩石の強度を基にした分類となっている。

Deer の分類はボーリングコアの長さに着目した分類であり、コアの長さを基に R Q D と呼ばれる指標を求め、 R Q D 値に対して一般的な岩盤の評価を与えていた。岩盤の不連続性に着目した分類になっている。

池田の分類は弾性波速度に基づく分類であり、物理的な測定値を用いた定量的な分類となっている。分類と支保構造とは直接関連づけがされるようになっており、土圧を介して支保構造の設計をするという手法は用いられていない。トンネルの標準設計が作成され、標準設計と地山分類とが関連づけられるという方法がこのころから一般化するようになる。

Wickham は弾性波速度や割れ目間隔の単独の指標を用いるのではなく、岩石の強度、節理間隔、方向、水の状態など多くの評定項目を選び、それぞれの要素の状態に応じて点数を与え、足し合わせることによって RSR(Rock Structure Rating)として指標化する方法を提案した。支保の設計は実績との比較で RSR と直接関連づけられている。

Bieniawski, Barton の地山分類も Wickham と同様に地山の種々の評定項目を地山の状態に応じて評価し、総合評価として RMR,あるいは Q 値を求めるようになっている。 RMR, Q 値は直接支保構造と関連が付けられている。

このように、初期の地山分類は、地山分類の結果として緩み高さあるいは荷重が求まるように組み立てられていたが、近年の地山分類は分類の結果として支保構造が直接求まるように変化している。荷重というものを媒介にして支保工を構造的に検討した上で構造規模を決定するという方法から、荷重の推定および支保工の構造検討に含まれる不確定で未知な要素をブラックボックス化して地質状況と支保構造を直接結びつける方法が一般

化したことになる。

地質構造と支保構造を結びつけるのは過去の事例、実績である。豊富な実績があつて初めてこのような手法が成り立つ。このような手法が一般化したのはトンネル工事が増加しデータが蓄積されたことを意味している。しかし、過去のデータを用いる限り過去のデータは正しかった、すなわち、適切な支保構造が用いられているということが前提になる。このような手法を用いる限りにおいて過去のデータ以上の合理化を図ることは出来ない。もちろん不具合が生じた場合のデータによって合理化を図る過程は含まれることになるが、多くの事例は保守的な選択がなされており、どの程度の安全率ないし余裕を含んでいるのかは明らかでない。しかし、地山の挙動が複雑であり定量的で解析的な検討が難しいことから地山分類が用いられるのであり、トンネル構造物における余裕が不明確になっていることは仕方のないことであるといわざるを得ないであろう。

現在、我が国においては、企業者ごとに地山分類が設けられ、支保構造、施工法等が定められ標準設計として運用されており、地山分類はトンネル工事の重要な技術的な要素になっている。

3. トンネルの安定機構

トンネルの支保構造を合理化するための努力は困難であっても避けられなければならない。また、実務では地山分類に基づく標準設計が用いられるとしても、設計の考え方を整理しておく必要がある。

近年数値解析法が進歩しトンネルのように解析解を得るのが難しかった構造物も解析することが可能となり、地山定数が把握できる場合や特殊なトンネルでは数値解析的な検討が多くなされるようになっている。このような解析では何を持ってトンネルの安定を評価し、設計を確定するかが問題となるが、統一的な評価方法が存在するとは云えない状況にある。地表の構造物であれば材料を選択することも可能であり、荷重も既知の値で、部材に生ずる応力を一定値以下に保つたり、限界状態を求めるこども比較的容易である。しかし、トンネルの場合はトンネルの主要な材料である地山という材料を選択することはルート選定の時以外は出来ず、また、荷重は未知量として取り扱わなければならないことが多い。従って、トンネル壁面に生ずる応力を一定値以下に保つことが出来るとは限らない。もちろん、支保工によってトンネル

周辺の地山の応力は影響を受けるが、その影響の程度は限定的であり、トンネル周辺の応力状態は本質的に地山の力学特性と初期地山応力によって決定される。地山が連続体であるとすれば極端に不良な地山や極端に初期地山応力が大きい場合を除いては、トンネル周辺の地山に弾性限度を超える過剰な応力が生じても空間の安定は保たれる。トンネルの周辺には塑性領域が形成され、塑性領域の大小はあるが応力的な安定上の問題は生じない。トンネル周辺に生じる応力過剰領域が先に述べたトロンペータゾーンと認識されるものであると理解することができる。

応力過剰領域の発生はトンネルの安定に対して二つの問題を提起する。一つはトンネルの掘削面の変位であり、もう一つは地山が過剰応力状態になった時の地山材料としての安定性である。

応力的には応力過剰領域が広がってトンネルの安定が保たれる機構が働くにしても、過大な変位が生じたのではトンネルは安定と見なすことは出来ない。このような場合は変位を抑止する必要がある。変位の抑止は支保工によって行うことになるが、変位をどの程度で収めるかによって必要とする支保の構造とその量は変わる。許容できる変形量が設計の要件として必要であるが、現在これに関して統一的な見解が示されているわけではない。許容する変形量によっていくつもの解が出てきてしまうことになる。現在の一般的な手法は支保の量が最小となるようにするのが合理的であるという説明がなされているが、後で述べるように、泥質な岩石の場合以外の通常の状態では変位がトンネルの安定上問題になるほど生じることは少なく、変位が支保工の適切な設計の基準となることはない。一方、泥質な岩石では過大な掘削面の変位が生ずることがあるが、このような場合は、変位を抑制するに必要な圧力は支保工の耐荷能力を超えることが少なくなく、実質的に変位を抑制するのは困難な場合があり、このような時には縫い返しを行って対応せざるを得ない。この点においても支保量を最小にするという考え方は、変位を抑止するという概念を越えて対処せざるを得ないことが生ずる。

過剰応力が生じた場合の地山の挙動は、連続体として挙動するとは云えない。地山材料は歪み軟化を起こす材料であることは云うまでのないことであり、過剰応力下では一体性を保つことは保証されない。すなわち、塑性変形というよりも、破壊の進行に伴って力学的な不連続面が形成される。掘削面のように一軸応力に近い拘束力の小さい状態では、沢山の剪断面が生じるダクタイルな



写真-1 掘削面に沿う割れ目

挙動よりも、主応力方向に並行する方向での破壊が生じやすいことが知られている。また、地山には元々力学的な不連続面が多く含まれており、掘削による応力解放によって緩みが生じて一体性を保ち得ない状況に容易に置かれてしまうことになる。一体性の失われたトンネル周辺の地山が直接的に重力の支配下に置かれれば崩壊や落盤という現象が容易に生ずる可能性が生じる。これはトロンペータゾーンと呼ばれたものに共通する。従って、支保工によって崩壊を防がなければならない。この際支保工には直接的な荷重として捉えることのできる力が作用することになる。この荷重は一般に緩み荷重と呼ばれているものである。緩み荷重の大きさは緩める、すなわちトンネル周辺の歪みが大きくなる、あるいは掘削面の変位が大きくなると増大すると考えることが出来、掘削面の変位を出来るだけ抑えることが必要である。このことは古くから現場において認識されており、掘削後出来るだけ早く支保工を施工するのが原則となっている。

地山の強度が不足する場合には支保工に作用する荷重を軽減するために変位を許容することが必要であるということと、緩みを抑えるために出来るだけ変位を抑制しなければならないという相反する要求を満たさなければならぬ中で適切な支保工の選択が要求されることになる。地山の特性や応力条件が把握しづらい状況でこの選択をすることは容易ではない。

この選択においては更に3つの重要な問題を考えおかなければならない。第1は我々が利用できる支保工の強度に限界があるということである。支保工の効果を支保压すなわち掘削面に与える支保工の圧力として評価すると、その値は最大でも1.0~1.5MPa程度であり、土被りが深い場合は变形を抑止する圧力としては限られたものである。

第2は支保の持つ変形性能と地山の変位量との不整合

の問題である。変形が問題になる場合には、地山の変位量はトンネルの半径の10%を超えることは珍しくはない。しかし、吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工、覆工の変形能力は0.5%程度の歪みが生ずると降伏してしまう。変位が問題となる場合の変形は断面がほぼ一様に変位するモードが一般的であるから、地山の変位と支保工の変位はほぼ一致することになり、地山の変位と支保工の変位能力には大きな不整合があることになる。これは、このような支保工を用いる場合、支保工の施工から0.5%程度の変位で安定を保つことが出来るような耐荷能力の大きな支保工を施工しなければならないことを示唆することになる。このようなことは常に可能であるわけではない。

第3の问题是、支保工の地山安定効果に与える影響が必ずしも明確にされておらず、設計手法が確立されていないという問題である。設計手法が確立されなければ試行錯誤を繰り返さなければならないことになる。

4. 支保工の特徴と問題点

前節で述べたように支保構造は相反する要求や支保の持つ限界の中で設計されなければならない。

通常のトンネルでは支保として、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工、コンクリート覆工が用いられる。標準設計では地山分類に応じてこれらが適宜組み合わせられて用いられている。どういう考え方に基づいて組み合わせがなされているのかは明らかにされていない。地山が悪くなれば、各支保工はそれぞれが量を増し重構造になるのが普通の標準設計になっている。我が国の標準設計はヨーロッパでの使用例を参考に改良が加えられてきたものであるが、各支保工の役割分担まで踏み込んだ分析は行われていない。

支保構造の設計思想を考えるにあたっては各支保工の作用効果、設計上期待する役割を分析することが重要である。各支保工の作用効果については既に多くの概念的な考え方方が示されている。ここでは、設計の考え方を整理するために適当な程度に纏めて置くことにする。

(1) 吹付けコンクリート

吹付けコンクリートの支保工としての特徴は、地山と密着して付着力が取れることである。この付着力によって、地山に存在する力学的な不連続面あるいは過剰応力の作用によって生じる不連続面が形成する不安定な岩塊

を掘削面で一体化し、トンネルの安定化を図ることを設計上期待することになる。言い換えれば不安定なキーストーンの脱落防止が設計上の考え方である。このような効果を期待するには吹付けコンクリートの厚さよりも、地山との付着力が重要である。その意味で付着力モデルと呼ぶことが出来るものである。

しかし、地山の強度が低下して十分な付着力が取れない場合は、吹付けコンクリートには軸力が卓越するようになり、アーチ作用によって、あるいは、リングとして地山を支持する作用に変わってくる。内圧効果によってトンネルの安定を保つことを設計上期待することになる。このような考え方をする場合、軸力が問題となるので軸力モデルと呼ばれることがある。このモデルでは吹付けコンクリートの厚さが支保の能力を左右する。

このように吹付けコンクリートでは地山の条件によって作用の機構が違うことになるので、ただ単に厚さを大きくするだけの問題ではない。軸力モデルを期待するのであれば、アーチとなる吹付け脚部の支持力度を確保する必要があり、不十分な場合はリングとして閉合することが重要である。また、付着力モデルの場合は吹付けコンクリートと地山は一体となっているから、掘削面の歪みが吹付けコンクリートの許容される歪みを超えるようなことが予測される場合は十分な機能を発揮することが出来ない。

吹付けコンクリートの支保工としての問題点は、破壊が生ずるときの歪みが地山の歪み、すなわち、トンネルの内空変位と整合がとれない場合があることである。言い換えれば、吹付けコンクリートで支保する場合は、トンネルの内空変位を0.5%程度以内に抑えるような設計をしなければならないということである。0.5%を超える内空変位が測定されることはしばしばあり、この条件は厳しい条件である。このため、可縮構造とすることが考えられたが、最近は使われていない。これは可縮構造としなければならない場合は、モデルとしては軸力モデルとなり、可縮構造にすることによって著しく耐荷能力を減少させ、吹付けコンクリートの効果が著しく減殺されることが経験されたためである。軸力モデルの場合はアーチ脚部の沈下等によってより大きな変位量に対応することがある程度可能であり、この方が良い成果を与えることが多いと想えることができる。吹付けコンクリートでは降伏してからも変位に追従できるようにすることが望まれ鋼纖維吹付けコンクリートの適用すべき条件を整理することも必要である。

(2) ロックボルト

ロックボルトのトンネルの安定に対する作用の仕方は、吹付けコンクリートの場合と同様地山の状況によって変わる。力学的な不連続面が発達する場合は、不連続面での移動を抑止することが主要な効果であり、ロックボルトは不連続面の状況に応じて配置されなければならない。不連続面の移動を抑止する効果はロックボルトの場合地山内部にも及ぶので、吹付けコンクリートの場合よりも有利である反面、ロックボルトは点あるいは線として作用せざるを得ないので、面として作用することの出来る吹付けコンクリートの場合よりこの点では不利である。

地山の強度が小さく不連続面の挙動がトンネルの不安定を支配するのではなく、地山の強度がトンネルの安定に直接影響する場合には、ロックボルトのトンネルの安定効果は、地山の変位とロックボルトの変位との差に基づいて生ずるロックボルトの地山拘束効果によることがある。すなわち、ロックボルトが掘削面周辺の地山の半径方向の歪みを拘束し、より高い3次元応力下に地山をおいてその強度を高める作用をする。この場合でも地山の変位が大きい場合には、ロックボルトには過大な歪みが生じ、ロックボルトが破断することもある。しかし、ロックボルトと地山との間には滑りが働くのが普通であり、ロックボルトは破壊されることなしに地山の大きな変位に追随することができる。ロックボルトにはフリクション型と呼ばれるものがあり、この形式のものは大変位に対する破断を回避する能力は優れている。ロックボルトと地山間で滑りが生ずると、ロックボルトが地山の強度増加に寄与する程度は減殺されることになるが、過剰な変位に伴うトンネル周辺地山の一体性の欠如を防ぐことができ、崩壊や落盤というようなトンネルの掘削において致命的な問題を回避することができる。

ここでロックボルトが変位の減少にどの程度の効果があるか検討してみる必要がある。表-1はロックボルトの間隔を変えた場合の変位の減少量をロックボルトを設けないときの変位の量との比で示した試算例である。計算条件は半径5mのトンネルとし、地山条件は変形係数1000MPa、初期地山応力5MPa、ロックボルトの径は25mm、長さ4mとし、問題を複雑化させないため、ロックボルトが滑る条件を除いて弾性計算とした。通常観測されるロックボルトの挙動を持たせるため、ロックボルトは0.1MPaの付着力であるとした。また、30%の応力が解放されたところでロックボルトが働くようになるものとした。ロックボルトがない状態では4.1cmの変位が生ずる。表はロックボルトの変位の拘束効果は非常に小

表-1 ロックボルトの効果の試算例

(間隔の影響)

ロックボルトの間隔(m)	ロックボルトによる変位の減少効果(%)	最大ロックボルト軸力(kN)
0.8	0.41	59.9
1.0	0.33	59.7
1.2	0.27	59.6
1.5	0.22	59.6
2.0	0.16	59.5

(長さの影響)

ロックボルトの長さ(m)	ロックボルトによる変位の減少効果(%)	最大ロックボルト軸力(kN)
2	0.09	31.4
3	0.17	45.5
4	0.27	59.6
6	0.51	8.96
8	0.79	12.0
10	1.09	15.1

さく、従って、間隔の影響は殆ど表れない。弾性の範囲での計算であり、また、ロックボルトを滑らせての試算であるので、効果が現れにくいが、ロックボルトの効果を変位の減少効果で見る限り有効な支保工とは云えない。表-1には同様の条件で、ロックボルトの間隔を1.2mに固定し長さを変えた場合の試算の結果も示している。この例からもロックボルトの変位拘束という意味での効果は限られている。ロックボルトの効果を的確に予測するためにはロックボルト-地山間の挙動を明確にする必要があるが、知見は少ない。

ロックボルトの設計において常に問われる問題がある。ロックボルトを配置するにピッチを細かくすべきかあるいは長さを長くすべきかという問題である。実験や計算では長さの合計で等量のボルトを配置する場合、その変位の抑制効果は大きく変わらないという結果を得ることが多い。施工のことを考えればロックボルトの長さは短い方が有利である。しかし、実際の設計ではこの点はあまり検討されず、従来の長さとピッチの比が尊重されるような設計になっている。従来の長さとピッチの比は不連続面の補強を主な対象としたものであり、連続体として挙動する場合でも、ロックボルトに対して不連続な挙動を示したときにも地山の安定効果を持たせる配慮が暗黙のうちにされていると理解することもできる。

ロックボルトには何を期待して設計しているのであるかということを考えることが必要である。図-1は角柱の供試体に圧縮方向と直交する方向に針金をロックボルトに見立てて配置し、圧縮したときの荷重-変位曲線である。図中0はロックボルトがない場合、3-15は3本の針金を撲ったものを15mmの間隔で配置したことを示している。極めて単純な実験であるが、ロックボルトに期待する特性が現れている。ロックボルトがない場合には、ピーク強度を過ぎた後急激な強度低下を起こしているのに対し、ロックボルトを配置したことを模擬したものでは、ピーク強度を過ぎても急激な強度低下は起こらず、ダクタイルな挙動を示すことが示されている。写真-2は供試体の状況であるが、ロックボルトを配置したことによる試験体はバラバラにならず、一体性が保たれている。

ロックボルトの効果は力で変位を抑えるのではなく、地山に過剰応力が作用した場合でも、地山の一体性を保ち崩落や落盤などの現象を生じさせないようにすることであると理解するのが適当であろう。もちろん、地山の歪み軟化による強度低下を防ぎ変位を減少させる効果も持ち、トンネルの安定化に寄与するが過大な効果を期待するのは適当ではない。

ロックボルトの支保としての問題点は、地山に対して面として作用するのではなく、点あるいは線として作用することである。従って、掘削面ではボルト間の岩塊の脱落を防ぐことが不可欠で、適切な肌落ち防止工を設計することが必要である。また、施工は現在人による直接の作業を必要とすることが多い、危険に十分配慮することが必要なことや、施工が確実に行われたかどうかを確認する手法が無いことも解決しなければならない点である。

(3) 鋼アーチ支保工

鋼アーチ支保工の作用は明快である。トンネルの内側から荷重を支持することによりトンネルの安定を保つことになる。しかし、どのような荷重を対象にして設計するのかということが問題である。緩み荷重を対象にするのか、あるいは、変位を抑止するために発生する荷重を対象にするのか、または、吹付けコンクリートなど併用される支保との関連で、どの部分の荷重を負担させるかなどの問題である。他のコンクリート系の支保が持つ脆性的な破壊挙動の改善のために用いられることがある。

鋼アーチ支保工は鋼材から出来ているという部材としての信頼感から、最終的なところとして用いられる

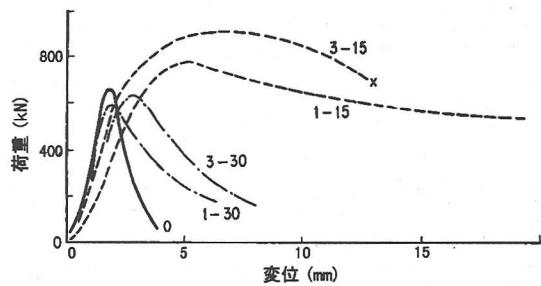


図-1 ロックボルトの効果の例

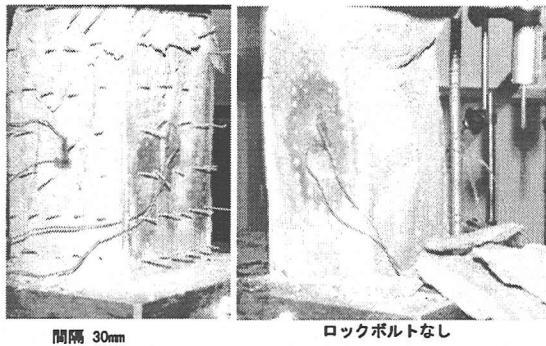


写真-2 破壊時の状況

が多い。鋼アーチ支保工を用いても支保工の降伏に達する時の変位が大きくなるわけではないが、降伏後の変位に対する追従能力は改善される。不確定な要素の多いトンネル工事では、このような判断のもとに使われるのも一つの方法であり、特徴があると云えるであろう。

鋼アーチ支保工は地山と密着して建て込むことは出来ず、地山と支保工の間には隙間が生じるので、木製のくさび（ブロッキング）で固定するか、あるいは、吹付けコンクリートが支保工の背面に良く回るようにして密着を図ることが必要である。鋼アーチ支保工の設計にあたっては、地山との境界条件が明確でないことに留意する必要がある。いずれにせよ、吹付けコンクリート、ロックボルトと組み合わせて使用する場合のトンネル安定に対する役割分担を明らかにしておくことが必要であるが、現状では必ずしも明確ではない。

鋼アーチ支保工の問題点は、トンネルの断面変化に対して適応性が低いことである。条件の変化に対応して掘削断面を変える場合にはあらかじめ対応しておかなければならない。また、建て込みの作業は切羽直近の作業になるので、安全に対して十分に配慮しなければならない。

(4) 覆工

覆工の力学的な作用は鋼アーチ支保工と同様にわかりやすい。トンネルの内側から支保压を地山に与え、トン

ネルを安定化させることである。アーチとしてあるいはリングとして荷重を支持する。覆工は厚さを大きく取ることが容易なので支保部材としては大きな耐力を持たせることができるものである。しかし、条件によっては地山を安定化するのに十分な耐力でない場合があり、また、内空変位に対する追随性の問題は吹付けコンクリートの場合と同様である。

覆工の問題点は支保構造としてその役割をどのように位置づけるかということであり、これについては後述することにする。

5. 計測による設計、施工の問題

吹付けコンクリート、ロックボルトが支保工として用いられるようになって、トンネルの安定問題は支保工の安定問題ではなく、地山の安定問題として捉えられるようになった。すなわち、トンネルの安定問題は掘削に伴う地山応力の再配分の問題として意識し、支保は応力再配分に影響を与えてトンネルの安定を補助する要素として認識されるようになった。このため、トンネルの掘削に伴う地山の挙動に注意が払われる。しかし、トンネルの掘削以前に、地山の挙動を的確に予測することは実用的に容易でないため、トンネルの掘削にあたっては組織的な計測が大がかりに行われている。これは計測によって地山の挙動を把握して、それを設計、施工に反映し、より合理的なトンネルとしようとする考え方である。この考え方の一見極めて合理的な考え方であるように思われる。しかし、これには支保工が地山の安定に与える影響が明らかになっていることが必要である。すなわち、用いる各支保工の作用効果、設計手法が明らかになっていることと、総合したときのトンネル安定の評価方法が明確になっていなければならぬ。現状ではこの条件は先に述べたように満たされていないというほかはない。逆解析が挙動を解明する有力な手法として用いられることがあるが、挙動として理解できても、トンネルの安定に関してどう理解すればよいのかは明確ではない。

このようなことから計測の結果は、変位の進行がなく力学的な平衡が保たれているか否かは判断されるが、合理的な設計にはなかなか結びつかない。計測の結果は、しばしば各部材の応力状態がどうなっているかによって判断されることがある。例えば、ロックボルトの軸力を測定し、ロックボルトに軸力が生じていればロックボルトは働いているから必要だと判断され、ロックボルトに

軸力が作用していない場合にはロックボルトはいらないのではないかというような議論がなされる。しかし、ロックボルトが必要か否か、あるいは、どのような量のロックボルトとすべきかは、ロックボルトが地山の安定にどのように寄与しているかで決まる問題である。ロックボルトは、ロックボルトと地山の変位特性の違いから軸力が発生してトンネルの安定効果に寄与することになるが、先に述べたようにロックボルトに生ずる軸力は地山の歪みに支配され、ロックボルトの断面積を増やせば、それにほぼ比例した軸力が観測されるのが普通である。これは、普通に使われるロックボルトの量では、変位の変化に与える影響は限定的であるためである。軸力の大小がロックボルトの効果を必ずしも示すものではないと理解しなければならない。

地山が比較的堅硬で不連続面の挙動がトンネルの安定に直接関わるような場合は、不安定となる恐れのあるキーストーンを留めれば、トンネルの安定が保たれる。極端な場合、キーストーンを留めるには一本のボルトがあれば良いことがある。もしこのような状態になつていれば、キーストーンを貫くボルトには軸力が発生することになるが、そのほかのボルトには殆ど軸力が発生しない。もっと極端な場合は不安定なキーストーンが形成されずロックボルトは働かない場合も考えられる。しかし、不連続面は規則性は持つものの複雑な分布をし、キーストーンの位置を確定するのは困難であるから、規則的にロックボルトを配置しキーストーンの脱落に備えるというのがロックボルトの使い方の一つである。このような場合ロックボルトに軸力が出ないからといってロックボルトが不要ということにはならない。

このようなことは吹付けコンクリートや鋼支保工にも云えることである。吹付けコンクリートや鋼支保工は軸歪みで0.5%程度以上の歪みが生ずると変状が生ずる可能性が大きくなる。支保工に変状が生じても、トンネル周辺地山は更に変位して安定する可能性があり、支保工が変状したからといって、トンネルの不安定性を必ずしも示すものではない。支保工の持つ耐荷力では、0.5%の歪みに相当する変位でトンネルを安定化することが出来なかつたということを計測の結果は示しているのである。支保工の設計としては問題であることは確かであるが、トンネルの安定上どのような支保が必要であるのかの答えを求めるのは難しい。

計測の結果は各支保工の設計目的との関連において、支保工相互の地山安定に対する効果を総合的に判断しなければならない。しかし、これは現在の知見では非常に

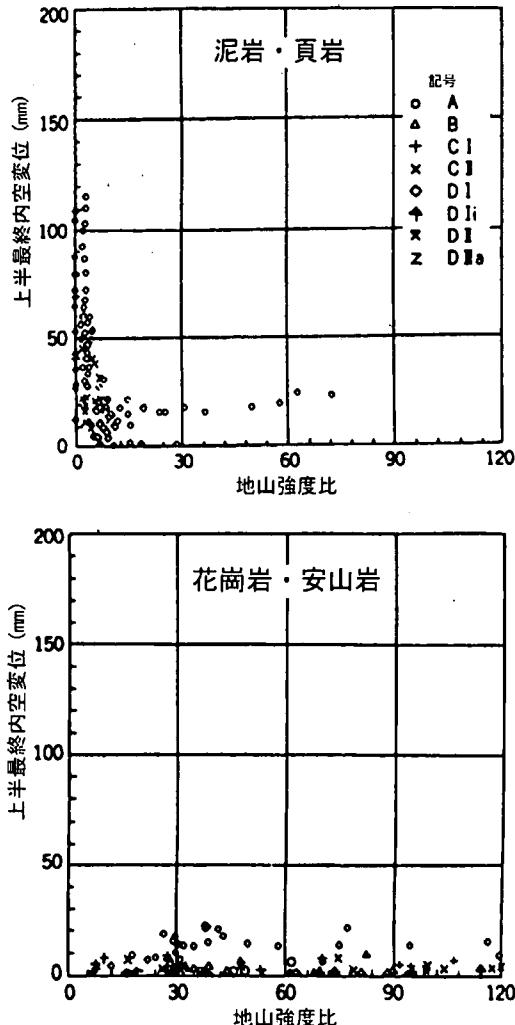


図-2 岩種ごとの内空変位の実績

困難である。

今までに膨大な量の計測データが蓄積されている。計測されたデータをどのように生かすかあるいは計測はどのようにすればよいかを考える上で過去のデータの分析は良い参考になる。図-2は道路公団が蓄積したもの整理したものである¹⁾。

これらの計測のデータを分析すると、内空変位は地山の種類の依存性が大きく、泥岩、頁岩、黒色片岩などの泥質な岩石では内空変位が問題になるが、花崗岩、安山岩、砂岩などのように岩の組織が粒状ないし石英質の岩石では内空変位は小さく、多くは掘削直後で内空変位は安定状態になる。

前者の状態は地山の強度自体が問題となり、塑性領域が拡がり、支保工には変位を拘束することによって生ずる支保圧が発生する。すなわち、応力再配分が問題とな

り、変位は理論上は地山強度比に関係し地山強度比が小さくなると大きくなる。計測の結果は地山強度比が小さくなると変位が増大する傾向は理論通り認められるが、理論値より数倍ないし一桁大きい地山強度比において変位が増加する傾向を示し、理論値とは一致していない。これは地山強度比を求めるときの1軸圧縮強度の評価が適切でないこと、内空変位には緩みによる変位が含まれる可能性があることが考えられるが、地中歪みを測定したとしても計測の結果から塑性領域を求めるることは困難で、トンネルを安定させるべき条件を求めるのは容易でない。また、支保構造と変位との関連性は薄い結果となっている。

後者においては変位が問題となるのではなく、トンネルの安定は力学的な不連続面によって引き起こされると考えて良いであろう。このような条件においては計測によって支保工の妥当性を判断することは難しく、むしろ切羽における地山状況の観察の方が有効な判断材料になる。

このように今までの計測の成果は、地山条件との関連で実績をふまえて計測計画および計測の結果を考えて行かなければならないことを示している。

6. 支保構造の考え方

現在の一般的なトンネルの安定確保の方法は、吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工および覆工を適宜組み合わせて支保構造全体としてトンネル周辺地山の不安定に対処することである。吹付けコンクリート、ロックボルト、鋼アーチ支保工は掘削後切羽直近で施工し、覆工の施工に先立って地山安定を図るもので支保工と通常は呼ばれる。これに対し、覆工は切羽から離れた位置で施工され、支保工とは違う側面を持っている。

支保構造を最も合理的なものにするためには、地山の状況に応じて、各支保工の特徴を生かして使っていくことが欠かせない。現在多くの標準設計に用いられている方法は先に述べたように実績に基づくものであり、必ずしも各支保工の特徴を十分に反映していない面がある。どのように組み合わせるべきかについて、各支保工の特徴、今までの計測で得られた知見を基に考えることにする。

トンネルの安定はトンネルの掘削に伴うトンネル周辺地山の安定の問題である。トンネルの周辺地山の安定の問題は大きく分けられ、地山の力学的な不連続性が主と

して問題になる場合と地山を構成する岩石の強度が問題となる場合に分けられる。後者の場合は内空変位が問題になるが、泥質の岩の場合に特に顕著で、石英質の岩の場合は過剰応力状態になつても通常の条件では変位が大きくなることはない。

力学的な不連続面を考慮しなければならない場合は、具体的には不連続面で岩塊が緩み、直接の重力の支配下に置かれ崩落を生ずる可能性を防ぐということである。この場合には緩みをできるだけ抑止するために早く支保工を施工する必要がある。この場合は、基本的には緩みを防止すれば、トンネル周辺の地山は場の応力すなわち初期地山応力に対して安定を保つことが出来る状態であり、既往の計測の結果が示すように生ずる変位も小さいので、早期に吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工を用いたとしてもその変形性能が問題となることはない。

支保工の選定はどのような緩みが生ずるのかを考慮して行うことになり、地山条件によって異なる。不連続面の間隔が小さければ、面的に支保する必要があり、吹付けコンクリートは不可欠な支保工となるが、断面が大きい場合は地山との一体性をより確保するため、ロックボルトの併用が必要であると考えられる。この場合はロックボルトは吹付けコンクリートの機能を確実にするために用いるものであり、主体は吹付けコンクリートであるということを認識して配置を決定する必要がある。

不連続面の間隔が中程度の場合は、ロックボルトが地山内部での不連続面に沿う動きを抑制するのに効果的である。従って、ロックボルトを主体の支保工として用いるのが適切であると考えられるが、肌落ち防止工が必要である。肌落ち防止工は金網、帶鋼なども用いられるが、簡便さから吹付けコンクリートが多く用されている。外見上は不連続面の間隔が小さい場合と同じであるが、考え方は異なることに留意する必要がある。

不連続面の間隔が大きくマッシュな場合には、支保の必要性は低くなる。この場合は、不連続面の状況を判断し、状況に応じてロックボルトを施工するランダムボルティングと呼ばれる方法がとられる。しかし、不連続面の状況の判断は難しく、大塊での抜け落ちが生ずることが少なくないので、パターンボルティングとすることもある。ロックボルトの設計はブロック状の脱落を防ぐよう設計される。

泥質の地山等で岩石の強度が挙動を支配し、内空変位が問題になる場合には、吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工が持つ変形特性と内空変位との間の変形性能の不整合の問題が起こる。岩石の強度が挙動を支配する場合

であっても、不連続面は存在し、また、過剰応力による歪み軟化は新たな不連続面を形成する。従って、岩石の強度が挙動を支配する場合は、内空変位の抑制あるいは内空変位に対する対応と緩みによる地山の一体化の低下に備えなければならない。緩みに対しては掘削後出来るだけ速やかに支保工を施工することが必要であり、内空変位に対する対応としては、支保工の持つ耐力の範囲内で安定を保つことが出来るよう適切な時期に支保工を施工するのが望ましい。これは相反する条件であり、難しい選択をしなければならないことになる。

緩みに備えることは基本的な条件であるから、掘削後速やかに支保工を施工しなければならない。吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工を用いれば変形性能の不整合の問題から変形が生ずる可能性が高い。これは、吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工の持つ耐荷能力では常に変位を抑制できるとは限らないためである。従って、変位の生ずるのは容認しなければならないことになる。

変位を容認した場合に、その変位に対応できる支保工はロックボルトが望ましい。ロックボルトは大きな内空変位に対応できる機構を持つと共に、特に大きな内空変位を考えなければならない場合には特殊な構造のボルトを採用することが出来る。しかし、軟弱な地山では肌落ち防止工が不可欠であり、施工上の都合を考えると肌落ち防止工は吹付けコンクリートによらざるを得ないというのが実状である。ロックボルトを主体とするときの吹付けコンクリートは肌落ち防止工としての設計をすべきである。すなわち、厚さを大きくとるのではなく粘りを持たせることが必要である。しかし、多くの標準設計では内空変位を考慮する場合でも、地山強度の低下にともない吹付けコンクリートの厚さを大きくとることが行われている。吹付けコンクリートの構造体としての変形能力は、軸力モデルとして働く場合、脚部沈下を生ずることによって理論的な値より大きな変位に対応することが出来る。吹付けコンクリートの厚さを大きくして支保圧の増大を図ることによって、変位を抑制することが出来る範囲が広がり、現実的な対応となっている可能性が大きいこと、また、実際に大きな変位が生じている時には、変位は抑えなければならないという現場の判断が働くことによるものと思われる。しかし、最大限の支保工を用いたとしても変位を抑えきれず縫い返しを余儀なくされた例も少なくない。

内空変位の抑制に対応する場合の支保工の組み合わせによる各支保工の働き方について留意する必要がある。理想的には各支保工がそれぞれ有効に作用することが望

ましい。表-1の試算と同様の条件で、ロックボルトの間隔1.2m、長さ4m、25cmの吹付けコンクリートを施工したときの状態を計算すると、無支保の状態に対する変位の減少効果は40%になる。ロックボルトの変位の減少効果に対して、吹付けコンクリートは圧倒的な効果を持つ。地山に対する支保圧力は、吹付けコンクリートによるものが2.25MPaであるのに対しロックボルトは0.05MPaにすぎない。ロックボルトは殆ど無視できる役割しか持たない。ただし、吹付けコンクリートはこのような大きな支保圧力には耐えることが出来ず破壊される。従って、このような設計は成り立たないことになるが、実際には吹付けコンクリートが硬化する段階でも変位が生じ、見かけの弾性係数は小さくなり、破壊が生じることはまれである。吹付けコンクリートが破壊される場合は、ロックボルトが吹付けコンクリートの降伏後にその機能を発揮することになる。支保工を組み合わせることは単なる足し算にならないことがあることに留意して、何を目的に組み合わせるのかを明確にして設計する必要がある。支保工の働き方は地山条件との関係で複雑であるから、単純ではないが、支保工間の作用の不整合があることを十分に考慮する必要がある。また、極端な場合を除いて、地山の変位を抑止することは困難で、地山の変位に見合った支保工の選定が重要である。

7. 覆工の役割

覆工は他の支保工と比べると特別な意味を持つ構造体である。覆工はトンネルの安定という力学的な機能以外に耐火や仕上げとしての内装などの機能を持つ。ここでは力学的な機能に関して検討する。

支保圧は地山の変位に依存して発生するものと変位に必ずしも依存しないが崩壊に直接つながるような緩み荷重によるものがある。

通常の場合は覆工を施工しない段階でトンネルの安定は確保されるから、覆工の力学的役割は曖昧になる。覆工は力学的な役割以外にも役割を持つので、現在は覆工を設けるのが一般的である。この場合でも、力学的な機能を覆工に期待している。これは、トンネルの主要な材料である地山は、時間と共に変化する材料であり、支保された現在の状態が、将来にわたって維持されるかどうかは保証がなく、また、前述したように支保された状態での安定の程度が不明確で、どの程度の安全性が確保されているか明確でないため、覆工によって安全性に対する

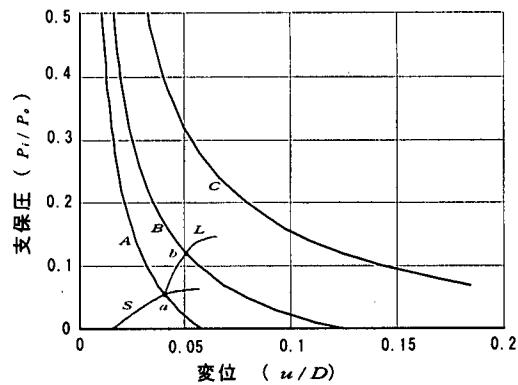


図-3 覆工の支保機構

る余裕を付加させておくという認識をしていると考えることが出来る。覆工をすることによって覆工が負担することが出来る安定性は明確に保証されることになる。覆工はトンネルの安定を確保する最後のよりどころとしての意味を持つ。

覆工の施工時期は通常は支保工で安定が保たれ、変位が収束したことを確認して行われる。この覆工の施工時期が支保工と異なることに留意する必要がある。図-3は地山特性曲線と覆工の特性曲線との関係からトンネルの安定点を模式的に示すものである。軸の数値に特に意味はないが、縦軸は支保圧 P_i を初期地山応力 P_0 で無次元化し、横軸は変位 u をトンネルの径で無次元化して示している。曲線 A は支保工を施工した時点での地山の特性曲線であり、曲線 B, C は地山が劣化した時の地山特性曲線である。S は支保工の特性曲線であり、L は覆工の特性曲線である。支保工のみで安定する場合は a で示される点でトンネルは安定することになる。覆工の特性曲線は a 点から出発し、地山が劣化して地山特性曲線が変化すると、それに応じた変位が生じて覆工による支保反力が発生して b 点で安定を保つ。ここで、着目すべきことは、支保工による安定が得られた時点で 覆工を施工することにより、支保工の持つ変形性能の地山との不整合を補い、支保構造としての地山の変形能力を高めることになっている点である。先に施工された支保工は変位の進行にともなって耐荷力を維持できなくなる可能性はあるが、覆工と地山によって拘束されることになるので、急激な耐荷能力の低下は緩和されるものと考えられる。また、支保荷重が変位を減少させる効果は、地山条件が悪い場合や変位が進んで地山特性曲線の勾配が小さいところで大きく、この点でも覆工の有効性は高い。トンネルの施工後地山が劣化して行くかどうかは地山によって異なることになるので、覆工に持たせる機能は、地

山条件によって判断して行かなければならない。また、支保工も時間の経過によって劣化していく可能性のあることも考慮する必要がある。

泥質な地山等で支保工のみでは変位の収束が出来ない場合には覆工によって最終的なトンネルの安定を確保しなければならない場合があるが、この場合は覆工に本格的に力学的な効果を期待した設計にしなければならない。しかし、必要とする支保圧が大きく縫い返しを余儀なくされるようなことがあり、覆工を施工する時期をどう選択するかは微妙な問題である。可能な限り早く施工すべきだと考える立場と耐荷能力や覆工の変形特性を考慮して施工すべきとする立場があるが、後者では変形や荷重の予測が難しく、前者の選択をやらざるを得ないというのが現状である。

覆工の意義あるいは設計の考え方には曖昧な点が残されているのは事実であり、議論を更に深めることが必要である。合理化を進める中で、厚さを軽減することがしばしば議論される。この方向の議論は非常に大切であるが、不確定要素の多いトンネルの支保構造において覆工は大きな役割を持っていることは間違いないことであり、最終的にトンネルの安定を保証する構造物である。施工中すなわち支保工の段階では落盤や崩落が生ずることは少なからず経験することであるが、覆工を施工して完成了トンネルでの落盤や崩落は二、三の例外を除いてほとんどない。この事実を十分に認識することが必要である。

8. 結 論

トンネルの設計の考え方は、地上の構造物の設計に比べると非常にわかりにくい。トンネルを専門とする技術者の間でさえ、考え方には違っている。これは地山という複雑な材料を対象とし、支保構造の作用機構や役割が必ずしも明確になっていないためである。従って、技術者の経験によるところが大きく、経験の違いにより多様な考え方方が可能である。支保構造の検討にあたっては次の

ことに留意することが必要である。

- ・支保構造の設計では、多様な選択が可能な中で設計の目標を明確にすることが必要である。
- ・土被りの小さな場合など特殊な場合を除いて、支保構造の設計の対象は、地山の緩みと掘削面の変位の抑止である。
- ・変位の抑止は泥質の地山の場合を除いて問題とする必要があることは少ない。
- ・緩みの防止のためには、支保工を出来るだけ早く施工する必要があるが、変位を考慮する場合は施工時期を遅らせるのが望ましい場合があり、支保工は相反する要求の中で選択を迫られる場合がある。
- ・支保工の耐荷能力には限界があり、変位を抑制するに必要な支保圧との間に不整合が存在する場合がある。
- ・支保工の変形能は小さく、支保工の変形特性と地山の変位量との間には不整合が存在する。
- ・各支保工はそれぞれ特徴を持っており、支保工に持たせるべき役割を明確にして、特徴を生かした使い方が必要である。
- ・計測の結果を生かすためには、支保工の設計手法を明確にすることが望まれる。
- ・覆工はトンネル安定の最終的なよりどころであり重要な役割を担っている。

支保構造の目的はトンネルの安定化である。トンネルの安定は本質的に地山に依存する。地山の特質を十分に把握し、各支保工が持つ特質と限界の中で、支保に持たせるべき役割を明確にして設計することが最も必要である。

参考文献

- 1) Karoly Szechy :The Art of Tunnelling, Akademiai Kiado Budapest 1973.
- 2) Proctor & White: Rock Tunnelling with Steel Support, Commercial Shoring & Stamping Co. 1946
- 3) 中田 雅博：比較的良好な地山における山岳トンネルの支保工選定に関する研究、博士論文、1999。

(2001.1.10受付)