

現況におけるトンネル支保設計の一般的な考え方

GENERAL CONSIDERATION OF CURRENT TUNNEL SUPPORT DESIGN

水谷 敏則*

Toshinori Mizutani

1. はじめに

現代社会を取り巻く環境は大きく変化し、国土の均衡ある発展、快適な環境の創造等が求められ、これに伴い以前と比較して多様化したニーズに対応した土木構造物の建設の必要性が増してきている。トンネルについても、従来と比較して断面が大きいトンネルの建設、切羽の自立が難しい地山における建設など、以前体験したことのないものに取り組んでいかなければならないことが想定される。よってトンネルの力学的かつ経済的になった設計の考え方等を検討することはますます重要となることが考えられる。

トンネル・地下空洞小委員会では、今年度から山岳工法の支保部材として適用されているロックボルトおよび吹付けコンクリートが、地山に与える支保効果を研究対象としてとり上げ、これらの支保部材が現状どのような効果を期待されて設計しているのか、または現状のトンネルの施工事例を Review し、それらの結果を踏まえ、現状の問題点を解決または改善するためには、どのような理論や概念を導入すればよいかを検討し、新しい設計の考え方を摸索することを予定している。

このパネルディスカッションではその本格的研究に先立ち、従来の知見を整理する意味をこめ、現状におけるトンネル支保設計の一般的な考え方とともに、硬岩と軟岩の各地山における施工事例と支保設計の考え方、その問題点等について議題に扱うことにした。

2. 現況の支保設計の基礎的考え方

現況の山岳工法による支保設計は、地山の強度を積極的に利用し、トンネルの掘削に伴う地山の挙動にあわせ、支保効果を最もよく発揮できるように、また常に支保と地山との相互作用を考えるように行なうこととされている。ここでは支保設計をおこなう上で重要である地山挙動を支配するとされる、緩み土圧および真の土圧の概念について述べる。設計の際には、いずれの土圧が挙動に支配的かを考慮することが重要であるとされている。

- 1) 緩み土圧 トンネルを掘削すると取り除かれた地山が負担していた応力が解放され、新たに内空周辺の地山に応力の再配分がおこる。再配分された応力が地山の強度よりも低ければ、地山自身は破壊しないが、地山には不連続面が存在するので、応力が地山強度より低くても不連続面において変位が生じて、地山が緩むという現象が生じる。仮にトンネル内空から、地山に向かって圧力をかけて緩みを抑えたとした場合、それに要する圧力のことを緩み土圧という。

*正会員 建設省土木研究所 (トンネル・地下空洞小委員会委員長)

2) 真の土圧 トンネル掘削に伴う、内空周辺の応力再配分後の地山応力が地山強度を超えると、破壊または塑性変形が起り、トンネル内空周辺には塑性領域が生じる。この場合、条件によってはトンネルの内空が保持できなくなることがあるが、それを保持するのに要するトンネル内空からの圧力を真の土圧という。

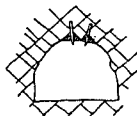
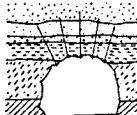
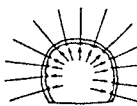
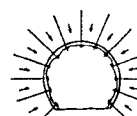
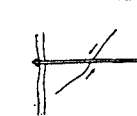
これらの土圧を抑えるための内圧と変位量との関係を概念的に示したものが Fenner-Pacher 曲線と呼ばれるものである。曲線は真の土圧が支配的である部分と緩み土圧が支配的である部分で構成されている。支保構造を設計する際には、内空変位等の計測結果を設計・施工へ反映させ、Fenner-Pacher 曲線であらわされるような地山特性、または支保特性、支保の経済性、地山条件、施工時期等を考慮して合理的な設計となるようにすることが重要であるとされている。

3. 現況におけるロックボルトの設計の考え方

ロックボルトの作用効果として現在考えられている定性的な概念を表－1に示す。亀裂の発達した中硬岩地山にトンネルを掘削する場合は、亀裂に沿った岩塊のはく落や移動などによる不安定性が問題となるので、そのときロックボルトには岩盤を一体化するような効果が期待される。表－1中では、縫付け効果、地山改良効果がそれに相当する。また軟岩地山を掘削した場合は、周辺地山の応力が岩石強度を超えて塑性化して地山が大きく変形することがあるので、そのときロックボルトには変形または塑性域の拡大を抑制するような効果が期待される。表－1中では、内圧効果、アーチ形成効果、地山改良効果等がそれに相当する。

配置の決め方には、岩盤の亀裂の間隔・長さ・大きさによって岩塊のはく落の可能性を想定し、はく落が発生しないようロックボルトの打設本数・間隔を決定する場合と、1本のロックボルトによる支保可能な荷重と支保すべき荷重の関係から打設本数・間隔を決定する場合とがある。

表－1 ロックボルトの作用効果の概念（トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説より）

ロックボルトの作用効果	概念図
① 縫付け効果（吊下げ効果） 発破などでゆるんだ岩塊をゆるんでいない地山に固定し、落下を防止しようとするもので、最も単純な効果である。亀裂、節理の発達する地山において、吹付けコンクリートと併せて比較的小さな目に対しても効果がある。一次覆工を地山に縫い付けるのもこれに当る	
② 梁形成効果 トンネル周辺の層を成している地山は層面で分離して重ね梁として挙動するが、ロックボルトによる層間の締付けにより層面でのせん断応力の伝達を可能として合成梁として挙動させる効果がある	
③ 内圧効果 ロックボルト引張力に相当する力が内圧としてトンネル壁面に作用すると考え、これによって、二軸応力状態のトンネル近傍の地山を三軸応力状態に保つ効果である。これは圧縮試験時の拘束力（側圧）の増大と同じような意味をもち、地山の強度あるいは耐荷能力の低下を防ぐ作用をする	
④ アーチ形成効果 システムロックボルトによる内圧効果のため、一体化して耐荷能力の高まったトンネル周辺の地山は、内空側に一様に変位することによってグラウンドアーチを形成する	
⑤ 地山改良効果 地中内にロックボルトが挿入されていると、地山のせん断抵抗力が増大し、地山の耐荷力が大きくなるばかりでなく、地山の降伏後も残留強度が増す。こうした現象は、ロックボルトにより地山全体の物性が改善されたということになる	

4. 現況における吹付けコンクリートの設計の考え方

吹付けコンクリートの作用効果として現在考えられている定性的な概念を表-2に示す。亀裂の発達した中硬岩地山にトンネルを掘削する場合、吹付けコンクリートには局部的な岩塊の崩落防止や弱層の補強が期待される。表-2中では、岩盤との付着力、剪断抵抗による支保効果、弱層の補強効果がこれに相当する。また不連続面の間隔が小さい場合、吹付けコンクリートには表-2中の、内圧効果、リング閉合効果、外力の配分効果が主に期待される。

吹付け厚さについては、土圧があまり作用せず、肌落ちや岩塊の滑り防止等を目的とする場合は薄くても十分であるが、土圧が大きく作用する場合、変形が大きい場合、未固結地山の場合、および土被りが小さく周辺への影響を極力少なくする等の場合は、支保の剛性を高めるために比較的厚くすることとされている。

表-2 吹付けコンクリートの作用効果の概念（トンネル標準示方書〔山岳工法編〕・同解説より）

吹付けコンクリートの作用効果	概念図
① 岩盤との付着力，せん断力による抵抗 吹付けコンクリートと岩盤との付着力により，吹付けコンクリートに作用する外力を地山に分散させ，またトンネル周辺の割れ目や亀裂にせん断抵抗を与え，落ちやすいキーストンを保持し，グラウンドアーチをトンネル壁面近くに形成させる。割れ目の多い硬岩等に作用効果が大きい	
② 曲げ圧縮または軸力による抵抗 比較的厚い吹付けコンクリートが1個の部材として地山を支持するため，できるだけ早くリングに閉合することが望ましい。周辺地山に内圧を与えることにより，地山を三軸応力状態に保持し，地山の強度劣化を防止する。軟岩や土砂地山等に作用効果が大きい	
③ 外力の配分効果 鋼製支保工，あるいはロックボルトに土圧を伝達する版として挙動する	
④ 弱層の補強 地山の凹みを埋め，弱層をまたいで接着することにより，応力集中を防ぎ弱層を補強する効果	
⑤ 被覆効果 風化防止，止水，微粒子流出防止などの被覆効果	

5. 現況における設計上の問題点

- 1) トンネル・地下空洞掘削時の地山の挙動，ロックボルト，吹付けコンクリートの支保効果，およびそれらの相互作用については定性的に知られているものの，定量的にはあまり明確にされていない。従来よりトンネル支保の設計は，経験的な判断に大きく依存し，他の土木構造物のような力学的解析だけでは対応できない性格を持っているが，現在の NATM の時代においても基本的には同様の課題をかかえている。

- 2) 現場では、施工中には内空変位等を計測し、さらに追加が望ましいと判断される場合は、地中変位、ロックボルト軸力等を計測して、周辺地山の応力分布状態、物性値の把握に利用することとしているが、計測結果を設計・施工に具体的、定量的に反映することは容易ではない。
- 3) 地山挙動を数値解析で解明するのによく用いられる手法にFEMがあるが、地山を連続体として扱う場合、実現象を再現しないケースが現れることから手法に限界がある。一方、地山を不連続体として扱う場合は、地山の不連続性の状態や頻度をどのように評価するのか、また不連続体岩盤の挙動をどのようにモデル化するのが問題である。
- 4) Fenner-Pacher の地山特性曲線で支保設計をすることが、実際の掘削時の地山挙動を考慮しているかどうかについては不明な点がある。実際の地山で変位が問題になるのは泥質岩等の特定の地山の場合であり、そうでない場合は支保を建て込むまでに変位は既に収束しているケースが多い。「緩み荷重」や「真の土圧」によって発生する変位の概念を支保設計に活かしきれていない。

6. 今後の支保のあり方について

NATM が日本の山岳トンネルの建設に導入されて 20 年が経過したが、NATM の設計概念は現在においてもイメージの領域を脱しない点が多い。その原因のひとつとして設計手法を定量的に扱えないことがあるが、いま一度地山に支保が与える効果も含め検討が必要とされるところである。

今後の技術開発の方向性については、鋼繊維補強コンクリート、高強度吹付けコンクリート、シングルシェルライニング、ケーブルボルト等の新しい支保材料の検討、または NTL や ECL 等の NATM とは異なる支保材料を持つ、すなわち異なる支保設計概念を持つ新しい工法の開発の検討などが挙げられるであろう。またそれらの新支保または新工法と、TBM、TWS といった高速施工、断面の早期閉合、大断面掘削を考慮した施工機械との一体化した支保工法の開発を行い、さらに経済的かつ合理的なトンネル建設を行うことは将来可能であると考えられるし、具体化のための検討が望まれるところである。

パネルディスカッションでは、まず東京電力(株)の小山俊博氏から「硬岩中の大規模地下発電所空洞建設」を、日本道路公団の三浦 克氏から「軟岩地山における支保効果について」を、近畿大学の久武勝保氏から「トンネルにおける吹付けコンクリートの支保効果」を、日本鉄道建設公団の北川修三氏から「膨張性地山におけるロックボルトによる地山補強について」をお話しいただく予定である。

今回の議論の成果を、今後の研究活動の参考にして進めていくためにも、多数の方々に参加していただき、活発なパネルディスカッションとなることを期待するものである。