

トンネル工学の現状と展望

京都大学

足立紀尚

1. はじめに

トンネルの建設は今に始まったわけではなく、長い歴史がある。しかし、近年のわが国における地下開発技術の発展には、目を見張るものがある。とくに、 240 ton/m^2 にも達する高水圧と劣悪な地山を克服した青函トンネルの建設は特記すべきであり、そこで開発された技術は単に山岳トンネルのみならず、都市部における地下空間の開発に対して、先駆的役割を果たしたと認識すべきである。長年にわたり培われた技術を継承し、地に足の着いた研究・開発に基づきさらに技術を発展させようとする姿勢が大切である。

このところ、多くの省庁、学会、機関で地下空間の建設技術に関する検討が行われており、数々の報告がなされている。そこで、ここではトンネルの建設を対象に、いくつかの問題をトピック的に述べることにする。

2. 地山の力学特性とトンネル掘削の基本理念

浜辺や砂場でトンネル掘りをした幼き日の思いでは誰にもあろう。白く乾燥していたり、水浸しの砂にトンネルが掘れなかったこと、適度に湿った砂にはトンネルが簡単に掘れたことなどを体験した。この幼き日に経験した事柄は、実際のトンネル建設でも常に直面する問題である。したがって大切なことは、“なぜ乾燥した砂や水浸しの砂にトンネルが掘れず、適度に湿った砂には掘れたのか？”の問に答えることである。力学的な解答は以下のようになる。すなわち、乾燥砂、飽和砂の破壊包絡線は原点を通るが、適度に湿った砂の破壊包絡線は見掛け上の粘着力により原点を通らず、一方掘削によるトンネル壁面近傍地山内の応力が一軸圧縮状態 ($\sigma_\theta \neq 0$, $\sigma_r = 0$ 、なお、トンネル軸方向の応力 σ_z は0でないから厳密には二軸圧縮状態) となるから、原点を通るモールの応力円で表される。したがって、乾燥砂、飽和砂ではその応力状態を表すモールの応力円は常に破壊包絡線と交わるため破壊が生じるが、湿った砂の場合には、破壊包絡線と交わらない応力状態が存在し得るからトンネルが掘れることになる。トンネルの力学を大層なものと考えむきもあるが、このような基本を理解して積み上げて行くことが重要と考える。

それでは、トンネル掘削の基本概念を説明しよう。トンネル掘削において水絡みで生じる問題をはじめ、幾多の問題はあるが、トンネルの掘削における基本理念は“トンネルはできる限り地山で持たせる”につきる。要するに、地山のせん断強度によってトンネルや地下空洞は極力保持されるべきであり、支保工や覆工は地山の補強を目的とした補助工であるとする考え方である。地下水対策工としての地下水低下工法や高圧湧水地山で用い

る水抜孔や水抜トンネルの役割は、地山が強度を発揮できるように水圧を減じ、有効拘束圧を増加させることでトンネル掘削を容易にするものであって、“トンネルはできる限り地山で持たせる”という基本理念に則っているわけである。

NATMは、現在わが国の標準工法として位置づけられているが、その特徴は以下の3点にまとめられよう。

- (1) “トンネルはできる限り地山で持たせる”というトンネルの掘削における基本理念に基づき、
- (2) 地山の強度維持と本覆工への土圧を均等に分布させ、かつ軽減させるべく、“地山は緩めず最大強度発揮時までに変形を留める”という考えに立ち、それらを具現化するため柔支保構造としての吹付けコンクリートやロックボルトを活用し、
- (3) 現場計測によって、上記機能の確認と本覆工の施工時期などの指示を行なう。

“トンネルはできる限り地山で持たせる”とか“地山は緩めず最大強度発揮時までに変形を留める”という基本理念はNATMのみの専売特許ではなく、トンネル建設における長年の経験において培われてきたトンネル掘削の基本思想である。これらのことから、トンネル掘削においては地山の力学特性を的確に把握することがいかに大切であるかが理解されよう。

3. 標準工法かシールド工法か¹⁾

従来、都市トンネルは開削工法やシールド工法によったが、底廉化のために標準工法の適用がはかれるようになってきている。標準工法は、機械設備への投資が少なく、シールド工法に比較して経済的に優れている。さらに、延長の短いトンネルや断面の変化するトンネルでは、シールド工法に比べ有利となる。

しかし、わが国の都市部の地質の大部分は、沖積・洪積等の未固結な地層で構成されているため、都市部で標準工法を適用する場合には、地下水を含む未固結地山を対象とした標準工法を開発する必要がある。土かぶり50m以下の未固結地山において、現状における標準工法とシールド工法の適用限界を明らかにするための調査が行なわれた。その結果、標準工法は以下の条件のもとで採用されていることが判明した。

- (1) 住宅密集地や構造物に近接するなど、厳しい条件のところでも標準工法が適用されているが、対象となる地質は洪積層までである。
- (2) 標準工法とシールド工法の適用条件を地山の物性値で検討すると、一軸圧縮強度 $q_u = 1.0 \text{kgf/cm}^2$ 、変形係数 $E_s = 100 \text{kgf/cm}^2$ の地山が、標準工法の適用の下限値といえる。
- (3) 都市トンネルにおける標準工法の適用に際しての、最大の問題は湧水の処理である。調査結果によると、トンネル切羽周辺の湧水量が100 l/min.以上であると、切羽は必ず不安定となっている。したがって、地下水の排除が可能であるか、湧水量を減ずる方策をとり得る条件が必要となる。

以上、都市トンネルへの標準工法の適用条件について述べたが、未固結地山での標準工法は、ほとんど地下水排除、切羽崩壊防止、地表沈下防止のために、補助工法を適用しており、補助工法を含めた技術開発が要求される。

都市トンネルでは、トンネル掘削による周辺地山の变形を極力減少させることが大切であって、プレライニング工法のさらなる技術開発が望まれよう。

4. 大深度シールド工法²⁾

シールド工法は、開放型と密閉型に大別できるが、大深度では密閉型が中心となろう。そこで、大深度対応のシールド掘削機に関する課題を挙げると以下ようになる。

- (1) シールド機体強度：シールド機体構造の中で、外水圧の影響を直接受ける場所は、カッタヘッド、カッタチャンバのバルクヘッド、機体のスキンプレート等である。この内、カッタヘッド、バルクヘッドについては、水圧分布に伴う曲げ荷重の増大が懸念されるが、カッタ支持を中間支持構造とすることや断面剛性を増加させることで対処可能である。一方、機体のスキンプレートは、とくに剛性の低いテール部の構造強度が問題となる。シールドテール部では、変形によるテールシール機能低下、セグメントとの接触、機体の姿勢制御性の低下が問題となることから、施工条件に応じた十分な設計検討が必要である。なお、バックリングに対する検討も大切である。
- (2) シール技術：外水圧が直接作用するものは、テールシールとカッタヘッドシールである。テールシールはシールド機テールとセグメント間で、地下水や裏込め注入材の流入を防止する機能を果しており、現在15 kgf/cm²までの高水圧に対抗するテールシールが開発されている。一方、カッタヘッドシールは、高水圧下では中間支持方式が採用されるため、その摺動距離が長くなりかつ交換不可能なことから、より一層の耐久性と高い信頼性が要求される。しかし、シール材質と形状の見直し、シール段数の増設やグリス注入の自動化等の対策により、耐圧 30 kgf/cm²のシールド機構の開発の見通しが得られている。
- (3) 推進力とカッタトルク：高水圧下では、装備すべき推進力およびカッタトルクとも大きくなるが、双方に対する装備値を増大させることに関する技術的な問題は無い。しかし、推力ジャッキの操作・制御法については施工条件に応じた検討は大切である。
- (4) 土砂搬送装置：土砂搬送手段は、工法別に流体輸送式とスクリュウコンベア式とに大別され、流体輸送式は高水圧に対する適応性は高い。一方、スクリュウコンベア式は、スクリュウコンベア排土口で大気圧まで減圧する必要があるため、種々の止水装置が検討されているが、5 kgf/cm²程度が実用上の限界であって、止水装置のみならず搬送方式そのものの技術開発が必要である。

さらに、大深度では長距離掘進が要求されるため、カッタビットの摩耗対策も重要な検討課題である。

5. 完全止水覆工か導水覆工か^{3),4)}

青函トンネルでは、完全止水覆工とすると最高 24kgf/cm^2 の水圧が作用するため、注入によって湧水量を減じトンネル内に導水する通常の上岳トンネル方式を採用した。都市トンネルでも大深度の場合には、完全止水方式でよいかどうかを検討することは必要であろう。

力学的安定も確保される、適正な注入域については、青函トンネルを対象にすでに検討されている³⁾。その際には、注入により透水性は改善されるが、強度・変形性は注入によって変化しないと仮定した。しかし、未固結土砂では、注入によって、注入域の強度、変形特性も改善されると考えられるから、先の解析解を発展させ、トンネル内に導水する場合と完全に止水する場合とで、覆工土圧がいかにより異なるかを検討した⁴⁾。その結果、完全止水覆工にするか、導水覆工にするかは、都市部大深度トンネルの1つの課題であることを強調しておきたい。

6. 昨今の興味深いトンネル

今日、数多くのトンネルが全国各地で建設され、また計画されている。その中で、とくに興味深いトンネルとして、舞子トンネル（本州—四国連絡橋・明石—鳴門ルート）、鍋立山トンネル（北越北線）ならびに陵シールドトンネル（京都地下鉄東西線）を紹介することにする。まず、舞子トンネルは大断面双設トンネルであり、さらに密集した住宅街の直下、大阪層群の砂礫層中を薄いかぶりで建設するところに特徴がある。鍋立山トンネルは、高圧ガスを含む第3紀の堆積岩中の掘削であったため、異常な地山膨張に遭遇し、難航を極めたトンネルである。京都地下鉄の陵シールドトンネルは、既設の京阪電鉄京都—大津線と新設する地下鉄東西線の相互乗り入れを図るため、陵区間では4本のシールドトンネルを平行に建設するもので、世界でも類を見ない4本並進シールドトンネルである。

参考文献

- 1) 桜井春輔、足立紀尚（1988）、都市トンネルにおけるNATM、鹿島出版会。
- 2) 橋本 正、大石善啓（1990）、私的討論による。
- 3) 足立紀尚、田村 武（1978）、高圧湧水下のトンネル工における水抜孔の効果と注入域の適正規模、土木学会論文報告集、第280号、pp.87—98。
- 4) 足立紀尚、田村 武、堀口知巳（1990）、高い地下水位の下でのトンネル掘削時の支保工反力についての考察、第45回土木学会年次学術講演会、第3部、pp.574—575。