トピックス

変化するトンネル技術 NATM後の動向

今田　徹
JICE 顧問

1. はじめに

技術は常に変化し発展するものであり、その変化は必ずしも連続的ではなく、新しい材料の出現などによって段階的に発展するという特徴を持っている。トンネルの技術も同じであり過去にいくつかの大きな技術の変革期を経てきている。最近のトンネル技術の動きが変革期に当たるのかどうかは別にして、最近のトンネル技術は地味で目立たないが大きく変化している。

トンネルは地山という自然に存在する材料を用いて構築される構造物であり、その設計施工は地山の特性に基本的に支配される。地山は極めて軟弱な地盤から硬岩まで多様であり、また、現状技術の実務的な観点で、その特性を把握することは容易でないという特徴を持っている。従って、一口にトンネル技術といっても多様であり、また、設計や施工にあったての定量的な評価は難しく、経験や技術的判断にゆだねなければならないことが多い。このため、色々な考え方や工法を生み、試行錯誤の結果として、トンネル技術が発展してきている。新しい材料の出現や機械の能力向上がトンネル技術の発展の基礎ではあるが、工法に対する考え方も極めて重要である。昔は考えられなかったようなこと、あるいは、避けなければならないようなことが逆に常識となりつつある。山岳トンネル工法を主として最近のトンネル技術の変化を考える。

2. トンネル技術略史

最近の動きを述べる前に簡単にその変遷をたどってみることにする。トンネルの技術は土木技術のみでなく、材料、機械技術などを含む総合技術である。それぞれの技術の発展の段階に応じて直面する課題は変化し、それを解決しながら発展してきた。たとえば、19 世紀に鉄道敷設の需要が高くなり、アルプスを越える長大トンネルを必要としたときの最大の課題は、硬い岩石を如何にして破砕するかであり、発破技術と削岩機の発達を促した。また、産業革命に伴い都市の発展が著しいロンドンでは、テームズ川によって二分された地域を繋ぐため河底トンネルを必要としたときは、軟弱な地盤を如何にして崩れないようにしてトンネルを掘るかが課題であり、シールド工法の開発につながった。それぞれの時代の要請とその時代の総合的な技術レベルの中で苦闘しながらトンネル工法は発展してきたといえる。

20 世紀に入るとトンネル技術の関心は如何に安全に能率良くトンネルを掘るかと云うことに移ってくる。一般的技術の向上によって岩石を破砕することなどの技術要素の基本的な問題は解決され、それぞれの技術の改良の問題は当然のこととして残るが、総合技術としてのトンネル工法の改善が中心課題となる。

この流れの中で問題となるのが地山の安定化技術である。山岳工法の場合、支保工を施工するまでの間は地山が自立することが必要である。掘削面がどの程度自立するかは地山の良し悪しと、掘削断面の大きさによって異なり、自立している時間は地山が悪くなるほど、掘削断面が大きくなるほど短くなる。必要とするトンネルの断面は用途によって決まるので工夫をして地山の自立性に合わせて施工せざるを得ない。出来る工夫は必要とするトンネル断面を分割して一度に掘削する断面を小さくすること、効率よく支保する技術を用いることである。掘削断面の分割の仕方は各種のトンネル工法を生み、日本式、イタリア式、オーストリア式など国の名前が付けられた掘削工法が出来上がった。トンネル工法は国の状況を反映する技術であるというところが技術の特徴をよく表しているように思われる。

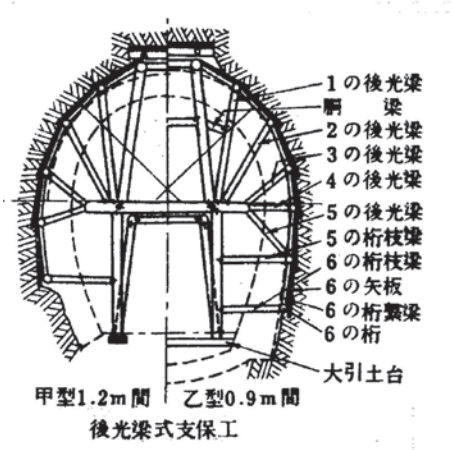

図-1　木製支柱式支保工

わが国では1960年代まで木製支柱式支保工が使われてきた。木製支柱支保工は多くの柱を立てる関係から、トンネル断面を柱で塞ぐようなことになり、機械化を進めるには限界があった。また、覆工を設ける際に柱で受けていた荷重を受け替える必要があり危険性が高い作業を伴っていた。支保工の改善がトンネル工法の重要な課題であった。60年代後半から70年代になると鋼アーチ支保工が普及するようになる。

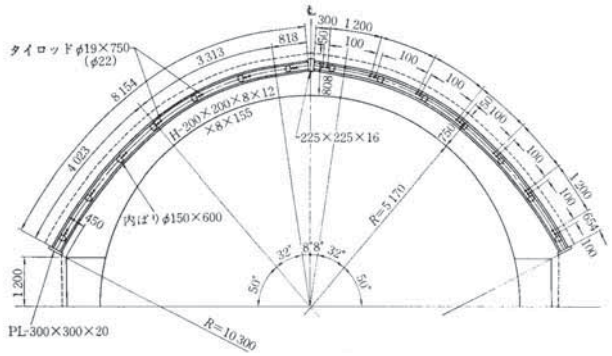

図-2　鋼アーチ支保工

鋼アーチ支保工では荷重をアーチとして支持するので、大きな施工区間を確保することが出来、機械化による効率的な施工が可能となるとともに、荷重を受け替えるという作業は無くなるので作業の安全性が格段に向上した。しかし、切羽の安定を得るためには地山の状況に応じて切羽を分割するということが基本であり、わが国の地山状況では道路トンネルクラスの断面では、全断面掘削が可能な地山はほとんどないと考えられていた。鋼アーチ支保工は名神、東名などの高速道路、新幹線、国道の一次改築など戦後の社会資本整備に大きな役割を果たした。

70年代後半になると鋼アーチ支保工を基本とする工法では機械の大型化による施工能率の向上も限界に達した感が出てくるようになり、次の飛躍のための模索が始められる。この中で着目されたのが新しい支保工としてのロックボルトと吹付けコンクリートである。吹付けコンクリートとロックボルトを主要な支保とする工法はＮＡＴＭという名称と共にヨーロッパで用いられるようになっており、わが国に導入する動きが盛んになった。ロックボルト、吹付けコンクリートはともに歴史の古い支保工であるが、わが国における関心は高いものではなかった。しかし、ヨーロッパでは実用に耐えうる技術として成長し、かつ、ロックボルトと吹付けコンクリートを組み合わせた総合された支保技術として発展した。

吹付けコンクリートとロックボルトを主要な支保工とすることは、支保工の設計の考え方に変革を迫ることになった。従来の支保工の考え方は、トンネルの掘削によって緩んだ地山を支保工により内側から支えて地山の安定を図るというものであった。しかし、ロックボルトは緩んだ地山を支えるという概念で整理するには無理があり、地山を補強してトンネルの安定を保つと考えた方が自然である。また、吹付けコンクリートも地山と密着した構造となるので、地山と吹付けコンクリートが一体となってトンネルの安定化が図られると見なすことが出来る。このことはトンネルの設計の際の関心事が、支保構造そのものの耐荷力からトンネル周辺地山のトンネル掘削に伴う応力の再配分問題へ必然的に移らざるを得にことを意味する。吹付けコンクリートとロックボルトを主体とした工法は支保材料の変化だけでなく支保設計の考え方を替えることになった。

吹付けコンクリートとロックボルトは優れた支保能力を発揮するため広く普及し現在のトンネル工法の標準工法としての位置をなしている。

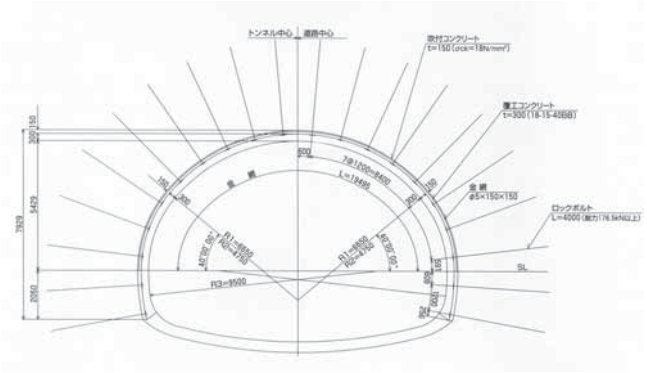

図-3　吹きつけロックボルト工法（NATM）

3. 2次元思考から3次元思考へ

吹付けコンクリートとロックボルトを主体とする工法（ＮＡＴＭ）が導入された時の設計の視点は、トンネルの横断面内での地山、支保を含めたトンネルの安定問題あった。いわば、2次元的な思考である。トンネルが最終的に安定する状態に対する検討のみが行われていたと云える。しかし、最近の地山安定化技術の進歩は、トンネル掘削の基本を変えようとしている。地山が不良で支保工施工までの自立性が保てない場合は、断面を分割して小断面で施工することが原則であったが、このような考え方で対応することは少なくなっている。ロックボルトの技術の延長線上で掘削前に地山をあらかじめ補強する先受け工と呼ばれる

技術が開発され、掘削前の切羽を補強することが可能となり、地山の特性をそのまま受け入れるのではなく、切羽に必要な補強を行って、施工に必要な断面を確保する手法が用いられるようになってきている。トンネル施工において合理的な施工を行うための要は大型の機械を効率的に用いることである。地山補強工の発達はこの必要性に合致するものであり、従来の消極的な切羽の安定化対策から、補強による切羽自立性の確保というより積極的な対策を可能にしたと云える。

写真-1　切羽補強対策

切羽で起きる現象は 2 次元の現象ではなく 3 次元の現象である。積極的な切羽安定化を進めるためには、切羽で生じる現象の解明が必要であり、必然的に 3 次元的なアプローチが進められることになった。その結果、切羽の安定性が合理的な施工の観点のみでなく、力学的なトンネルの挙動に極めて重要であることが認識されるようになった。トンネルの掘削に伴う力学的な挙動は 3 次元的な概念で検討し、理解するようになっている。

4. 全断面掘削

切羽を安定させる技術が開発されたこと、切羽における 3 次元的な挙動の理解が深まってきたことから、トンネルの掘削工法は出来るだけ大きな断面での掘削を目指すようになっている。道路トンネル規模の断面でも補助ベンチ付き全断面工法が広く採用されている。従来、日本の地山では全断面掘削は小断面の場合を除いて無理であるというのが一般的な認識であったことを考えると、大きな変化である。全断面で掘ることの利点は大型の機械による施工能率の向上が上げられるが、力学的には全断面掘削をすることによって切羽の直近で支保工の閉合が可能になることである。地山が軟弱に場合、上部半断面工法のような分割工法を採用すると、上半支保工脚部の支持力が不足し、支保工全体の沈下を大きくして、地山に有効な支保圧を与えることができないという問題が生じる。このため、ウイングリブのように支保工脚部の面積を大きくするという手法やフットパイルを打設して支持力を増加させる手法が用いられた。しかし､その効果は限定的であることが少なくなく、周辺地山を緩めることになり、トンネルの安定性に悪影響を与える結果となる。トンネル掘削面の変位は、トンネルの切羽が到達する前から始まり、切羽の通過によって急に進行し、切羽から離れると設置された支保工の支保圧とバランスして平面応力状態としての最終値に達する。

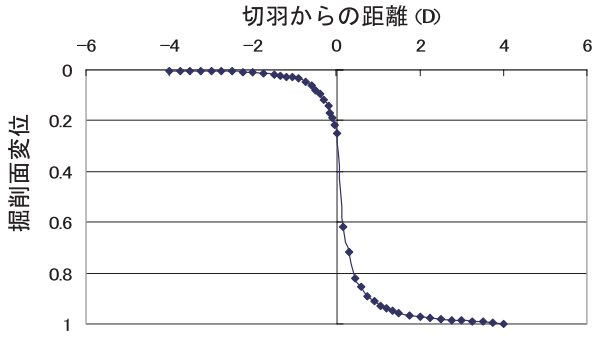

図-4　切羽付近の挙動

掘削直後の切羽の安定は切羽前方の地山の支保効果によって保たれている。切羽は最も有効な支保であり、切羽の支保としての能力を落とさないようにすることが、自立性の確保に最も必要である。また、支保工は切羽が支保としての能力を有効に働かせている間に、すなわち、切羽の近くで、その能力を最大限発揮できるように施工することが望ましい。切羽分割では支保工も分割して施工することになり、支保が有効に作用するには時間がかかる。全断面で掘削が出来れば､切羽直近で支保工の閉合が可能となり、支持力の問題を気にすることなく支保工の能力を最大限発揮させることが出来る。すなわち、地山が悪くなるほど早期閉合の必要性が出てくると云うことになり、全断面での掘削が必要となる。これは従来のアプローチとは全く逆である。最近は早期閉合のため、全断面工法を採用する事例が増えている。

最近は環境問題からトンネル構造の道路が採用され、住宅の直下をトンネルで通過する計画が増えている。このよ

うな場合、トンネルの掘削による地盤沈下を極力抑える必要があるが、早期閉合は地盤沈下の抑制に有効である。

5. 単純化ー双設トンネル

道路トンネルでは上り、下りの 2 本のトンネルを必要とすることが多い。従来の双設トンネルの設計の基本は 2 本のトンネルがお互いに影響を与えず独立したトンネルとして掘削できるように必要な距離を離すことであった。これはトンネルを掘るという点では合理的な考え方である。しかし、都市では用地の問題などから出来るだけトンネルを近接させて設けることが望ましく、二本のトンネルを接近させて計画することになる。この場合、トンネル構造に過大な負担をかけることなくどれだけ近づけることが出来るかが検討課題である。多少の離間があれば、相互の影響は考慮しなければならないが、掘削は独立したトンネルとして行うことが出来る。計画上離間をとることが出来ない場合は、二つのトンネルを一体化したいわゆるメガネトンネルとなる。従来のめがねトンネルは、中央部に導坑を設け、アーチ部の荷重を中央部ピラー、側壁で支持する構造を用いるのが普通であった。この構造は複雑であるとともに、導坑、上部半断面部、下部半断面と何度も掘削を繰り返すことになるので、工期、工費がかかるだけでなく緩みを助長し、施工上問題を生ずることが少なくなかった。

これに対し､最近のメガネトンネルでは導坑を全く省き、離間距離がゼロであっても二本のトンネルを独立に施工するようになってきている。このような設計が出来るようになったのは、大断面での施工が可能となり、特に、全断面掘削では支保工の早期閉合により支保工の能力を最大限利用できるようになって、トンネルの安定性に信頼が置けるようになったためである。もちろん、二本のトンネルの相互作用は大きくなるが、設計上対応可能な範囲である。それぞれのトンネルを独立して施工することによって施工上の単純化が図られるだけでなく､設計も分かりやすくなり、また、工期、工費の縮減を図ることが出来る。

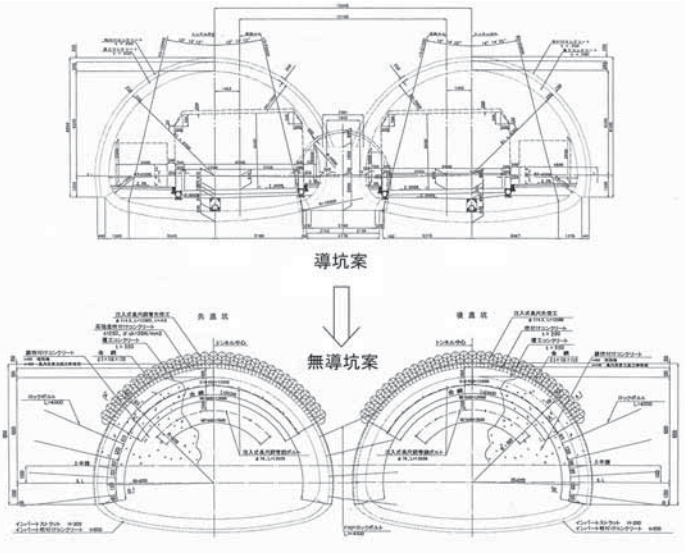

図-5　双設トンネルの変遷

写真-2　超近接無導坑メガネトンネル

6. 一掘進長と支保構造

トンネルを掘削する際の 1 掘進長は、従来は支保工の立て込み間隔によって決められていた。支保工の立て込み間隔は、木製の支柱式支保工や鋼アーチ支保工を使う場合は明確である。切羽から離れて平面応力状態になったときでも十分に耐えうる支保工を一基づつ着実に施工しながら工事を進めていくという手法がとられてきた。しかし、切羽での 3 次元的な挙動と最終的に必要とする支保構造とは必ずしも関連するものではない。トンネルの施工を効率的に進めるためには一掘進長は長い方がよい。このため長孔発破技術を適用して一掘進長を長くしようとする試みがわが国でもされるようになった。

わが国では地山条件が悪く長孔発破に適する地山は少ないというのが現在の一般的な認識である。この認識には支保工の間隔を守らなければならないと云う意識が強く働いている。切羽安定に対する対策が進歩していることを考えると、一掘進長は何によって決められるのかを再度検討することも意味がある。掘進長は切羽が安定する長さによっ

て決まると考えるのが妥当である。切羽での問題の多くのは切羽面（鏡）での不安定現象である。また、鏡の安定性が改善されれば、当然、支保された区間と切羽の間の無支保になる部分の安定性は改善される。これに見合った一掘進長を設定することにより合理的なトンネル施工が可能になる。一掘進長の延伸は、地山の良好な A,B 地山のみでなくそれ以下の地山の場合でも検討の余地がある。この際には従来の考え方に囚われず支保構造を見直すことも必要である。

7. 曲面切羽の勧め

トンネル掘削の力学的な過程は 3 次元的に捉えることが必要であり、こうすることによってトンネル切羽の力学的な重要性が認識され、また、切羽安定化対策工の進歩より、切羽の安定性確保に重点を置いた、従来では考えられなかった合理的な工法が採用されるようになってきている。しかし、切羽安定化に要する費用と時間はそれ相当に必要とする。切羽安定化工法を更に合理化することは重要な課題である。

現在、切羽は直立したものが一般的な形状である。ベンチ工法やリングカット工法はいわば凸型の切羽形状と考えることができる。従来の概念としては、凸形の切羽形状はあっても、凹形の形状は考えられなかった。全断面の直立形の切羽は従来の切羽の概念の極限というべきものと考えても良いかもしれない。しかし、直立形の切羽は力学的に見ると必ずしも合理的なものと云えない。図-6 左に直立切羽の主応力の状況を示す。これを見ると切羽においても応力の流れはアーチアクション（ドームアクション）が生ずることを示している。ドームアクションから取り残された部分は、掘削により緩むと重力の直接影響の下に不安定な状態の置かれることになる。これは矩形断面のトンネルが安定上不利になることと類似している。図-6 右には、切羽をドーム作用から取り残される部分を除いて曲面にした時の主応力の流れを示す。曲面の切羽では掘削面の応力はなめらかに流れていることがわかる。図-7 には直立切羽、曲面切羽のそれぞれの最大剪断応力分布を示している。寒色から暖色になるほど値は大きくなる。直立切羽では中央付近において剪断応力が地山内部より小さくなるところが見受けられるが、曲面切羽では掘削面に沿ってほぼ一様な状態となっている。掘削による影響範囲を応力の変化で見てみると、直立切羽でも曲面切羽でもほぼ同じ範囲になっており、切羽全体の応力の変化に与える影響は殆どない。また、図-4 に示したトンネル縦断方向の掘削面変位にも殆ど変化はない。直立切羽に見られるドーム作用から取り残された部分は切羽の安定に殆ど寄与しない存在であると見なすことが出来る。この部分は掘削の緩みにより不安定になりやすい部分であるから初めから取り除いておいた方が良い部分と云える。

掘削後の切羽を安定させる最初の手段は切羽吹付けである。最近では安全意識の向上から切羽吹付けは余程問題がない場合を除いて一般的に使用されるようになっている。吹付けの作用を考えたとき直立平面では浮いた小岩塊の崩落を防止する程度でその効果は限定的にならざるを得ない。しかし、曲面切羽であれば吹き付けコンクリートのアーチ作用を期待することが出来、切羽吹付けはより有効に働き、切羽の安定性を増加させることが出来る。切羽ボルトも掘削面に垂直に打つことにすれば、切羽ボルトによる掘削領域外の安定効果を期待でき、また、地山内部でのドーム形成に有効である。地山の状況にもよるが AGF などの切羽上部の補助工法を削減することが出来る可能性がある。

このように力学的に見れば、地山内部の応力の再配分、支保として切羽安定化対策の上から有効であることが明らかではあるが、凹形切羽となる曲面切羽は使われることは殆どない。これは、凹形切羽は従来の経験にそぐわないものであり、なかなか踏み出せないと云うことではないかと思われる。最も心配される点は上部がオーバーハング状態になる曲面切羽の自立性が保たれるか、という点である。また、保たれたとしても支保の設置作業が安全に出来るかどうか、ということではないかと思われる。曲面切羽は直立切羽よりも自立性は良いことは、崩壊が生じてしまった切羽の形状から類推できる。曲面状に切羽が崩壊することは良く経験される。オーバーハング状態になった無支保のところに立ち入ることは避けなければならないことはもちろんであるが、支保を施すのに人が立ち入る必要はなくなってきている。吹付けロボットを用いて容易に切羽吹付けを施すことが出来る。曲面切羽な論理的な点および施工の点からも実施可能な方法であると考える。条件の良いところから試行し、トンネルの施工が更に合理的なものになることを期待したい。

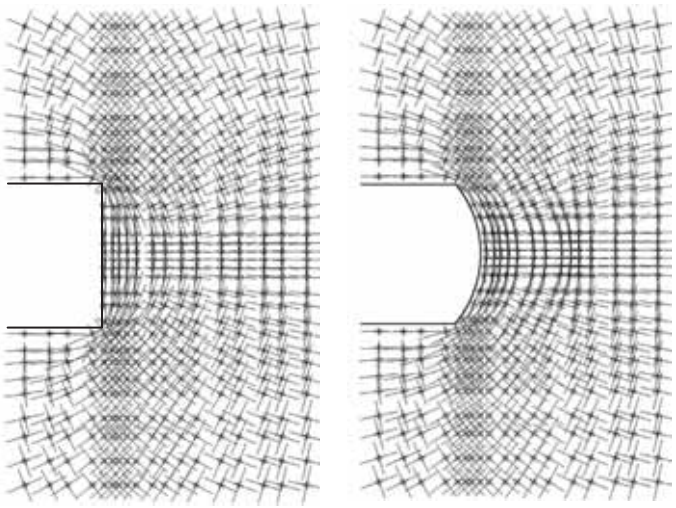

図-6　切羽における主応力の流れ

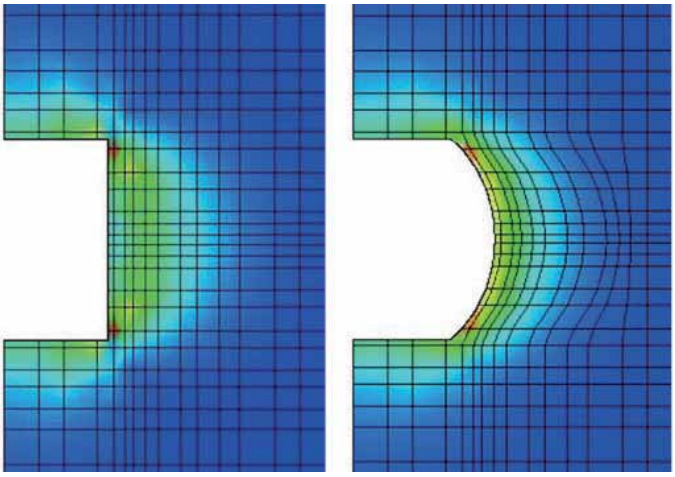

図-7　切羽における最大剪断応力の分布

8. 山岳工法とシールド工法の境界

山岳トンネル工法の動きを述べたが、シールド工法も大きく変化している。シール工法は都市のトンネル工法として完成度の高い技術であり、厳しい環境条件の下でも良い成果を得ることが出来るが、高コストと位置づけられる工法であった。しかし、シールド工法は高速、長距離掘進などの合理化が急速に進められ、工費、工期が大幅に小さくなってきている。

近年、環境問題などから都市内あるいは近郊の道路計画ではトンネル構造が採用されることが多くなっている。従来は、山岳工法が可能であれば、工費の点から山岳工法で計画されるのが普通であった。山岳トンネルはここで述べたように早期閉合の積極的な採用などによって、厳しい環境条件にも対応できるようになり、適応領域が広がってきている。しかし、シールド工法の低価格化は、従来の山岳工法の領域を浸食するようになっている。山岳工法とシールド工法の境界は、従来とは異なってきている。山岳工法を用いるかシールド工法を用いるかは悩ましい問題になっている。山岳工法を用いるのか、シールド工法を用いるかによって、線型の計画などの基本的なものが異なったものになる。もちろん、地盤条件や計画の規模、環境条件によって明確な結論が出る場合もある。しかし、トンネルの技術の変化は激しく、熟慮が必要である。

9. おわりに

トンネル技術は選択肢が非常に多い。また、進歩も速い。最近のプロジェクトは計画から実施までの期間が長期化する傾向にある。実施の段階では計画が必ずしも技術にそぐわないものになってしまうことがないとは云えない。計画時の工法検討は慎重に行うことが必要であり、その時点の技術、コストにとらわれることなく、将来の技術の動向を十分に考慮することが必要である。既存の計画では適宜、技術の動向を見極め、技術の最適化を図る必要性が大きくなっている。

技術も常識が変わることは珍しいことではなく、常識にとらわれず常に技術の動き、本質をとらえるようにしたいものと考える。