

岩盤構造物の性能評価における課題

ー 山岳トンネルにおける先進ボーリングの効果について ー

亀村勝美

深田地質研究所

On the Performance Evaluation of Tunnel and Underground Cavern - Rational Tunnel Construction using Advancing Boring -

KAMEMURA Katsumi

Fukada Geological Institute

要旨：山岳トンネルの建設工事ではまず事前に地質調査が実施され、その結果に基づいて地山分類が行われる。そして支保パターンと掘削工法が指針などに基づいて設定され、施工計画が立てられる。しかしながら、実施工においては、予期していなかった地山条件に遭遇し、支保の追加や補強、掘削工法の変更などを余儀なくされるケースは少なくない。結果として、トンネル周辺地山の掘削影響領域が拡大し、トンネル構造の性能の低下を招く。こうした状況を避けるためには、トンネル切羽で得られる地山情報を的確に評価し、適切な支保パターンにより施工することが重要である。ここでは、北海道で建設されたトンネルで実施された切羽からの先進ボーリングに基づく地山分類結果を詳細に分析し、その効果について検討した。

キーワード：山岳トンネル、岩盤分類、先進ボーリング、情報化施工

Abstract: In the construction of mountain tunnel, a rock mass is classified based on the pre-investigation result. Then support pattern and excavation method corresponding to a rock class is decided based on the specification, and construction is executed. However, there are many cases where reinforcement of supports, change of excavation method and re-excavation are necessary because of the difference of rock condition from the initial assumption. As a result, the performance of tunnel may deteriorate. In order to avoid this situation, proper evaluation of geological information which is obtained at tunnel face is essential. Here, the rock classification result based on the advancing boring from the tunnel face executed in the tunnel constructed in Hokkaido was analyzed in detail, and the effectiveness of advancing boring was examined. As a result, it was shown that the advancing boring was effective for a reasonable, economical tunneling work.

Keywords: mountain tunnel, rock classification, advancing boring, observational construction

1. はじめに

我が国では、複雑でしかも風化・変質した地質に起因する必ずしも良いとは言えない施工条件にもかかわらず、多くの山岳トンネルが建設され供用されている。そして供用開始から長い時間を経

るとともに山岳トンネルは、様々な状態変化を生じる。それらは、湧水の発生・増加、覆工コンクリートのひび割れ発生などのトンネル構造の安定性に直接影響を及ぼす心配のない軽微なものから、複数のクラックの発生、進展に伴うコンクリート片の剥離などのより深刻なものまで様々である。

中には明らかに外力の作用の結果として生じるトンネル内空変位の増加、側壁の変状、路盤の隆起などトンネルの機能に重大な支障を来すものもあり、この場合には大規模な補修工事を余儀なくされることになる。また時には、予期せぬ覆工コンクリート塊の剥落などの安全を損なう事態を生じることもあり、トンネルの機能と安全を保つための合理的な維持管理は重要な社会問題となっている。

供用上の問題を生じるようなトンネルの変状については、土木学会岩盤力学委員会において議論され、その原因が分析され、原因に対応した対策工のあり方が示されている（土木学会，2003）。しかし、既に供用されているトンネルに対する大規模な対策工は、単に高額の工事費を要するだけではなく、工事期間中の交通・物流機能の低下など2次的に生じる社会的損失も大きく、対策をより困難なものにしている。

トンネルの維持管理においては、このような事態に至らぬようにすることが重要であり、そのためには施工中に得られた地山特性に関する情報に基づき、トンネル供用後の経時的な状態変化の可能性を評価した上で、地山特性に適合した掘削法、支保パターンを選択する必要がある。しかし、事前の地質調査、施工中の観察・計測などによる情報だけでは、的確に供用後の変状の可能性を評価することは難しい。

本論文では、トンネルの維持管理として変状などが生じた後の事後的な対策ではなく、施工中の観察・計測に基づいた適切な支保パターンによる施工を基本とする予防保全的な対策に着目し、その有効性を示すとともに、それを可能とする具体的な方法の一つとして先進ボーリングの効果について検討する。

2. 情報化施工管理における課題

道路トンネルに関する技術基準は日本道路協会によって昭和37年、当時の代表的工法であった矢板工法（鋼製のアーチ支保と地山の間の隙間に木製の板：矢板を入れ、地山を支える工法）を対象として道路技術基準（トンネル編）として制定され、その後の技術の進歩に伴い昭和49年と平成元年に改定されている。そしてこの基準の解説書として平成元年6月、「道路トンネル技術基準（構造編）・同解説」が刊行されている。この時の改定の一番の要点は、それまでの矢板工法を中心とした内容から、吹付けコンクリート・ロックボルト・鋼アーチ支保工を組み合わせた工法（いわゆるナトム＝NATM：New Austrian Tunneling Method）を標準とした内容に変更したことにある。この間、鉄道トンネルについては「NATM 設計施工指針（案）」（鉄道建設公団）が昭和58年に、高速道路トンネルについては「設計要領改訂」（日本道路公団）が昭和60年に、そして土木学会「トンネル標準示方書（山岳編）・同解説」が昭和61年にNATMを標準工法として改定されている。

NATMの特徴は、地山から作用する荷重を剛な支保により支える矢板工法とは異なり、吹付けコンクリートやロックボルトなど地山との密着性に富んだ支保を用い、支保と地山が一体となった安定的なトンネル構造を造り上げることにある。そしてもう一つの特徴が、施工中に得られる様々な情報を活用し施工管理を行うことにある。図1はその情報化施工管理の概念を示したものである。トンネルはこの図に従い以下のようにして施工が進められる。

- (i) 事前地質調査を行い弾性波速度 V_p 、ボーリングコアの状況・RQD、地質条件、不連続面

- の間隔、切羽自立時間などの項目について評価する。
- (ii) 調査結果に基づき地山分類を行う。
 - (iii) あらかじめ設定されていた地山分類毎の支保パターンの中から対応するものを選択する。または数値解析などを行い、支保パターンを決定する。
 - (iv) 施工を開始する。
 - (v) 施工中に地質観察、地山と支保の挙動計測を行い、支保パターンが適切であったかを判断する。
 - (vi) 設計時に設定した管理基準に基づき対策の必要性を判断する。必要であれば支保パターンの変更、掘削法の変更、再設計、再調査などを行い、次の切羽の掘進に掛かる。
- (v)→(vi)を繰り返す。

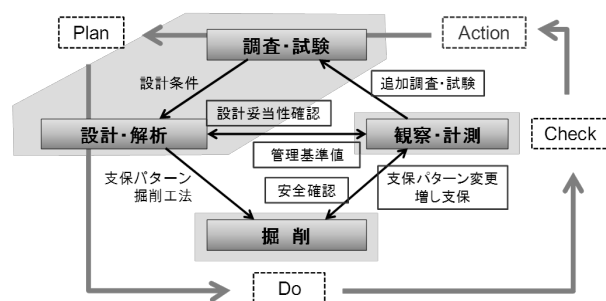


図1 観測的手法によるトンネル施工の概念

このように切羽において得られる情報を観察・計測ごとに活用して最適なトンネル構造を構築するのがNATMである。図1に示したようにNATMにおける一連の作業は、様々な製品などの品質管理システムにおいて用いられるPDCA（計画→実施→チェック→対策）のループに対応しているもので、トンネルという製品の品質を確保するためのものである。しかし、このような施工法が必要ということは、トンネルの計画から施工に至る

様々な項目の中に多くの不確実なものが存在していることに他ならない。

実際、地質情報における不確実性の存在という山岳トンネル特有の問題から、施工中に限らずトンネルの供用後においても変状を生じ、対策工を講じることを余儀なくされる事例は少なくないのが現状である。とはいえNATMの要諦である施工時の観察・計測結果を評価し、設計の変更・更新を行うための判断は非常に難しく、改定された基準においても詳細な説明が成されていない。そして、これを補完するために平成5年11月「道路トンネル観察・計測指針」(日本道路協会, 2009)が出版された。

その第4章「観察・計測結果の評価と活用」では、既施工区間の安定性を「切羽の観察と評価」と「計測・既施工区間観察等」により評価し、それとともに、切羽前方における支保の選定を行うとしている。ここで留意すべきは、その中で切羽観察について次のような問題点が指摘されていることである。すなわち「現状では切羽観察結果から地山情報を評価・判定し、適正な支保パターンを選定する手順が必ずしも明確でない。」のである。

その後、多くのトンネルが施工され観察・計測の実績が蓄積されるとともに、観察・計測及び探査技術が長足の進歩を遂げたことを受け、平成21年に最新の知見を盛り込んだ改定版が出版された。しかしながらその中においても、情報化施工管理の理念、方法論は示されているものの、実務での具体的な評価方法は確立されていないと述べられている。

このように情報化施工の本来の機能を発揮させるためには、切羽における観測・計測で得られた情報を次の掘削に的確に反映させる手法の確立が不可欠である。

3. トンネルの変状と対策工の現状

トンネルは、施工中あるいは供用後であっても様々な原因で変状を生じている。ではそうした変状への対策工はどのように行われているのであろうか。

岡崎ら（2011）は、トンネルの完成後あるいは供用後に発生した変状について20事例を収集し、分析を加えた。これらのトンネルにおける変状の発生時期は、完成後0～24年と様々であり、矢板工法のものもNATMのものもある。また半数は施工中にも変状を生じている。そして事例の全ては地質性状に起因するものである。分析の結果、以下の事項を指摘している。

- トンネル建設後に、施工中の地質情報や施工記録を再整理し、台帳化することで、その後の維持管理やトンネル点検、地質性上に起因する変状の発生を予測検討するための情報として活用できる。
- 掘削後経時的に風化・劣化が生じるような地山に対しては、掘削時にインバート（トンネルの左右の側壁の下部を繋ぐ逆アーチ（下に凸）の覆工で、地山からの荷重に対するトンネルの耐荷力を向上させる目的で設置される）設置の必要性の有無を判定するための指標の検討が必要である。

その上で、供用開始後に経時的な地山変位が継続し路盤が持ち上がり舗装に亀裂が入ったり、覆工コンクリートにクラックが発生したため対策工としてインバートの設置を行ったものの、後に再度変状が生じた事例の工事費について検討した。その結果、事前または施工中の調査によって変状の予想される個所を精度よく抽出し、施工中に上

位の支保パターン、すなわちより大きな荷重を想定した支保へ変更することにより総工事費を縮減できることを示した。

すなわち事後対策は高くつくものであり、施工中の観察・計測によって経時的な変状の可能性を的確に判断することが重要となる。しかし、それは難しい。

一方、亀村ら（2010）はリスクの概念を用い、供用後の経時的な変状の発生の可能性がある場合には、その変状が万が一発生した場合の損害を算定した上で、リスク（＝変状が生じる可能性×結果として生じる損害）を評価することにより、施工中に必要な対策工を講じるべきか、あるいはその必要はないのかをトータルコストの観点から判断できることを示した。

ここで言う変状の可能性とは、必ず発生する、しない（すなわち確率でいう1または0）の判断ではなく、発生するかもしれない（例えばその可能性は50%）、あるいはほとんど発生しない（例えばその可能性は10%）といった数値で示されるものである。こうした一見曖昧な数値によってもリスクという有用な判断指標が得られるのである。

亀村（2012）は、この考えに則って岡崎ら（2011）が検討した変状トンネル事例についてリスクを評価した結果、対策工の設定に当たって実施する予測解析が80%の確率で的中するという仮定条件下では、変状の可能性が30%程度であっても対策を講じる方がリスクを含めたトータルコストを抑制することが出来ることを示した。

すなわち計測によっても明瞭な変形挙動が認められない場合、あるいは変形の時間依存挙動は認められるものの収束するのか、構造物や地山の性能に影響を与えるのかどうか等の判断が出来ないような場合には、致命的な状態を招かないために、供用後の状態を推定し、その損害の大きさを評価

した上で、適切な対策を講じる必要がある。

とは言え、やはりこれまでの情報化施工の中で行われてきた施工中の切羽観察結果や計測結果などのデータから変状の可能性を次の切羽掘削までの短い時間内に評価し、適切な支保パターンへと変更することは難しく、予防保全のための新たな地質情報の入手と活用は不可欠である。

4. 事前設計の問題点

山岳トンネルが施工中や供用後に変状を生じ、その対策に多くの追加費用を必要とする一因として、事前調査とその結果に基づく事前設計が実態を反映したものになっていないことがある。土木学会ではこのことについてトンネル工学委員会に検討部会を設け、様々な観点からの検討を行い、その成果をライブラリーとして出版した（土木学会、2007）。

その中で、事前の評価結果と実際が合わない（地質が違う場合と地質は合っているが工学的性質が異なる場合の2つがある）原因として次の5つを示している。(1)地質調査技術の限界、(2)不十分な地質調査、(3)事実と解釈の区別、(4)地質解釈の個人差、(5)残された問題点の成果物への明記である。

ここで(1)と(2)は、地質情報を得るためのハード的な問題であり、その問題の解決は容易ではない。(3)と(4)は調査結果として得られるデータを設計や施工に反映させるための工学的判断を行う、いわばソフト的な問題と考えることができる。これについては施工が完了した時点で、どのような地質情報でどの段階でどのような判断、解釈が行われたのか、そしてその結果はどうであったのかを多くの事例について検証し、その中から具体的な問題点を抽出する必要がある。しかし個々のトンネル施工結果に対する幾つかの検討事例はあるも

の、統一的な検討はこれまで行われたことはない。

そして(5)は、地質調査結果の解釈にかかわる問題点、知見などの情報が調査担当者から設計施工担当者に伝わらないことのいわば施工システム上の問題ということができる。この問題についてはこれまでも様々な議論がなされており、地質技術者と設計技術者の意思疎通の必要性がたびたび指摘されていた。しかしながら、いまだに根本的な解決に至っていないのが現状である。

さてこの土木学会のライブラリーには、事前設計と施工時の支保パターンについて日本道路公団が建設した37本、総延長41.6 kmのトンネルについて分析した結果として表1が示されている。これは事前調査に基づいて設計時に設定した地山等級が、実際に施工された際に評価された等級と一致したのか？実際には良かった（上位側）のか？あるいは実際には悪かった（下位側）のかを示したものである。

これを見ると全体的な傾向として想定と実際が一致するのは4割程度しかなく、上位への変更は1割、下位への変更は実に5割にもなっている。この結果は、トンネル施工経験者の「地質調査結果は余り当てにならない」という感覚とそう違いはなく、事前調査に基づく地山等級判断がいかにか難しいかを示している。

表1 設計時と施工時の地山等級岩種ごとの変更の割合(%)

	上位側	一致	下位側
片岩	9	26	66
粘板岩	14	53	34
花崗岩	6	54	40
凝灰角礫岩	20	42	39
砂岩頁岩互層	7	36	57
泥岩	5	42	53

こうした状況に対し、坑内からの先進水平ボーリングの有効性が指摘され、実際坑口部の地山条件が悪い区間や難施工が予想される断層破碎帯などに対して水平ボーリングが実施された事例は少なくない。しかしその有効性については具体的に検討されてはいない。

5. 先進ボーリングを用いたトンネル施工

(1) 北海道における山岳工法トンネルの施工

北海道の道路トンネルでは、北海道開発局の定める設計要領に基づきトンネルの調査から施工までが行われている。その基本は、高速道路事業者や日本道路協会が定めるものと同じであるが、施工中の情報に関して大きく異なっている。

北海道開発局道路設計要領第4集トンネル(平成24年4月)の第11章観察・計測工では、「地山の条件や掘削時の挙動を把握し、支保構造の設計や施工方法をより最適なものに変更することによって、工事の安全性と経済性を図る」として観察・計測工に加えて施工中の調査が規定されている。その解説で「従来、施工中における前方地質の検討は、切羽状態を経験的、定性的に判断して実施パターンを検討する方法が多く用いられ、地質の悪い区間や破碎帯が予想される場合においてのみ、先進ボーリングで調査精度を高める方法が取られてきた。しかし、昨今、NATMトンネルの計測管理によって、施工後の内空変位等による定量的検証手段が確立されるに至って、施工前の実施パターン決定に用いる前方地質確認手段に、よりいっそうの定量的、継続的な判定が要求されてきている。」とし、施工中の先進ボーリングを全線において実施することを原則としている。ちなみにこの先進ボーリングの全線実施の原則は、平成3年の道路トンネル設計施工要領(北海道開発局建設部道路建

設課)から、その解説に記載されている。

(2) 先進ボーリングの有無とトンネル内空変位

岡崎ら(2011)は、先進ボーリングを実施した北海道内の16トンネルの最終内空変位と、先進ボーリングを行っていない全国のトンネルの最終内空変位を比較した。その結果、先進ボーリングを実施したトンネルでの最終内空変位は、全ての地山クラスにおいて先進ボーリングなしで事前調査結果のみで施工した場合より小さくなっており、施工時に行う先進ボーリングの有効性が示されているとしている。

岡崎ら(2011)が示した北海道の16トンネルの最終内空変位計測結果に新たに、平成24年度に北海道土木技術会トンネル研究委員会 NATM 分科会が収集したデータを追加し、計57トンネルの地山分類毎の最終内空変位の累積頻度分布(亀村ら, 2013)を示したのが図2である。

これと比較するために図3には、「道路トンネル観察・計測指針」(日本道路協会, 2009)に示されている先進ボーリングが行われていない全国のトンネルにおける地山分類毎の内空変位とその発生割合(図に示す変位量を下回るケースの発生割合)を示す。全国のトンネルにおける最終内空変位が、全般的に北海道のそれに比べると大きいことは一目瞭然である。

その差を具体的に見るために変位発生割合が50%と90%の時の変位量を地山分類毎に抽出すると表2のようになる。これを見ると、地山等級が下がるとともに変位が増加する両者の傾向は類似しているものの、全国のものでは全体に変位量が大きく、C1とC2の差がほとんどないことが判る。このような違いが生じる最大の原因は先進ボーリングの有無にある。

(3) 地山分類の違い

こうした内空変位の差が先進ボーリングの有無にあると結論付けるためには、全国と北海道にお

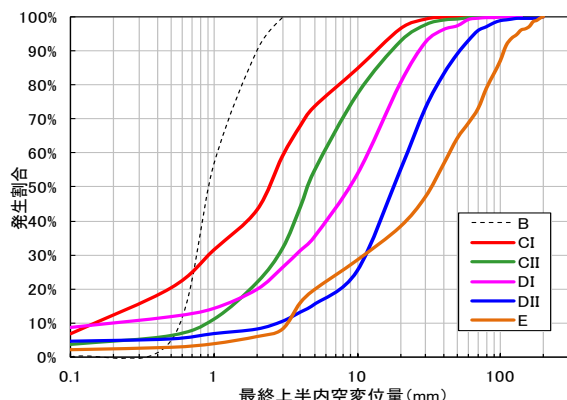


図2 地山分類毎の内空変位（北海道 57 トンネル）

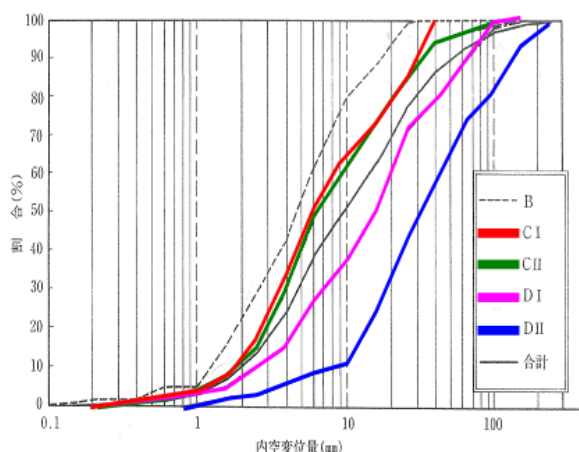


図3 地山分類毎の内空変位（全国）

表2 地山分類と内空変位 (mm)

	発生割合50%		発生割合90%	
	全国	北海道	全国	北海道
B	4.7	0.9	16.8	2
C1	5.8	2.4	28.8	12
C2	6.4	4.3	32.2	16
D1	15.6	9	62.9	25
D2	31	17	134.6	52
E		31		105

ける地山等級の分類方法が同一でなければならない。

先進ボーリングが行われていない全国のトンネルのデータは、旧日本道路公団試験研究所が2車線道路トンネルの施工実績を全国的に収集しまとめたものである。したがってそれらのトンネルにおける地山分類としては、旧日本道路公団の定めたものが用いられていたと考えられるが、この地山分類は、現在も高速道路事業者が定める設計要領第三集トンネル編や日本道路協会が定める道路トンネル技術基準に示されているものと同じである。

これに対して北海道開発局の道路設計要領第4集トンネルにおける地山分類では、日本道路協会の地山分類を基本とするものの開発局独自の地山分類を示している。その上で「地山等級の評価に当たっては、トンネルの地質調査結果を用いて、日本道路協会分類表に従って地山等級を判定した後、得られた地山定数がその地山等級に対応するかを北海道開発局分類表で確認して最終的に決定するものとする。」（設計要領第4集2.4 トンネルの地山分類〔解説〕）としている。すなわち二段構えになっている。

ここで分類表の違いを具体的に見るために岩種として花崗岩と第三紀の泥岩を例として地山等級と弾性波速度の関係を示すと図4のようになっている。

このように日本道路協会分類表で示される弾性波速度は、地山等級間で重なり合う部分があり、等級の決定に当たっては地山に関する他の情報を必要とする。これに対し開発局のものは、重複することなく設定されており、弾性波速度だけでも等級の決定は可能となっている。また両者は必ずしも対応しておらず、花崗岩のBやD1、第三紀層泥岩のC1ではかなりの違いが見て取れる。

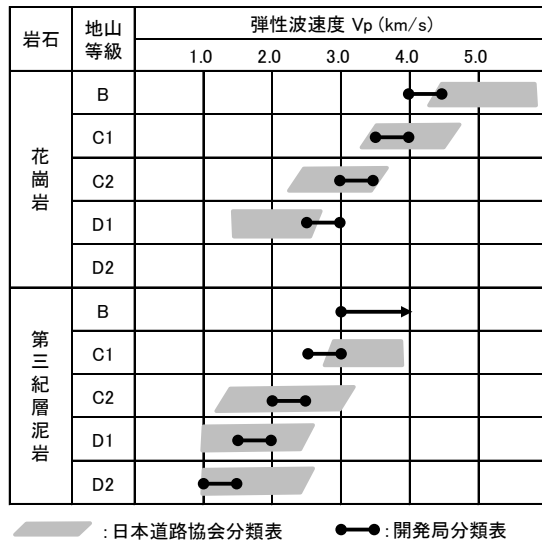


図4 地山等級と弾性波速度の関係

ここで示したように地山分類方法は、北海道(開発局)と全国(日本道路協会)で同じではない。日本道路協会の分類表で弾性波速度が二つの等級に対応する場合の判断や、北海道における日本道路協会分類表と開発局分類表の二つを用いた最終的な地山等級の決定の詳細は不明であるが、基本となる地山分類が同一であることから多少の差はあっても分類結果はそう大きく違っていないと考えられる。

(4) 先進ボーリングの効果

表2に示した計測結果の発生割合50%の場合の最終内空変位と地山等級の関係を図示すると図5のようになる。このように、全国と北海道の差は歴然としている。図中、「全国」として示したのは全国の結果の地山分類を1ランク悪い方へ移動させた場合であり両者がほぼ一致していることは注目に値する。

すなわち最終内空変位で見ると、先進ボーリングなしで施工したトンネルの場合、同じ地山等級では先進ボーリングを用いたトンネルの場合の

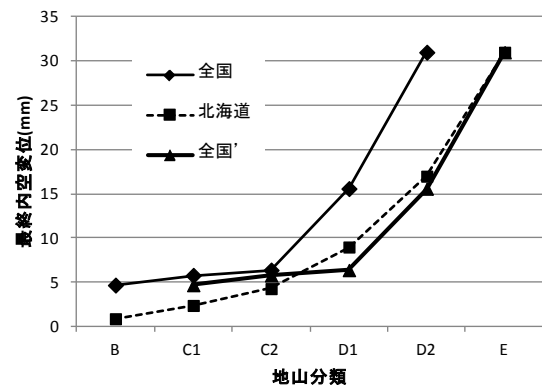


図5 地山等級と最終内空変位の関係

およそ倍の変位が生じている。例えば地山等級D1では北海道のトンネルにおける9 mmに対し、全国のトンネルでは16 mmとなっている。また同程度の内空変位が生じる地山等級を比較すると、例えば全国のトンネルのD1, 16 mmに対し、北海道のトンネルのD2, 17 mmというように1等級の差がある。

地山評価基準に大きな差はないとすると、この違いが生じる原因として考えられるのは、4章(表1)に示したような事前調査結果に基づく地山評価の実施工結果との一致率が非常に悪いことである。そこで先進ボーリングの有無による地山等級の一致率の差について検討する。

表3は、北海道における63トンネルでの施工結果に基づいて事前調査結果による評価と実際の結果、先進ボーリング調査による評価と実際の結果の関係を示したものである(亀村ら, 2013)。例えば、事前調査結果に基づき評価された地山等級C2の377区間の内、施工時の評価もC2と一致したのは320区間(85%)であったのに対し、D1やD2と悪く評価されたのは57区間(15%)であった。

これらの結果から先進ボーリングの効果を見るために事前と施工、先進と施工における評価結果

を比較し、一致したのか、良くなったのか、悪くなったのかでまとめると表4のようになる。このように事前調査結果と施工結果が一致しているのは66%で、27%は想定より1段あるいは2段悪い結果となっている。しかもその内容を表3から詳しく見ると、C1、C2からD1、D2へと変更した

表3 事前調査結果、先進ボーリングと実際の施工区分

事前	施工	割合(%)	先進	施工	割合(%)
C1 (129)	C1	24	C1 (42)	C1	25
	C2	94		C2	17
	D1	11		D1	0
	D2	0		D2	0
	E	0		E	0
C2 (377)	C1	0	C2 (394)	C1	1
	C2	320		C2	382
	D1	29		D1	10
	D2	28		D2	1
	E	0		E	0
D1 (77)	C1	1	D1 (132)	C1	0
	C2	28		C2	32
	D1	42		D1	82
	D2	6		D2	16
	E	0		E	2
D2 (62)	C1	1	D2 (72)	C1	0
	C2	1		C2	12
	D1	13		D1	4
	D2	39		D2	56
	E	8		E	0
E (4)	C1	0	E (9)	C1	0
	C2	0		C2	0
	D1	1		D1	0
	D2	0		D2	0
	E	3		E	9
計	649		計	649	100.0

表4 地山評価の一致率

事前調査による評価			
施工結果	件数	割合(%)	
3段良くなる	1	0.15	6.93
2段良くなる	3	0.46	
1段良くなる	41	6.32	
事前＝施工	428	65.95	65.95
1段悪くなる	137	21.11	27.12
2段悪くなる	39	6.01	

先進Br.による評価			
施工結果	件数	割合(%)	
3段良くなる	0	0.00	7.50
2段良くなる	12	1.85	
1段良くなる	37	5.70	
先行＝施工	554	85.36	85.40
1段悪くなる	43	6.63	7.10
2段悪くなる	3	0.46	

のは全体の10% $\{=(11+29+28)/649\}$ に及ぶ。

C1、C2の支保パターンは図6に示すように底盤の水平な掘削面が路面となるのに対し、D1、D2の支保パターンは図7に示すようにインバートを設置し、トンネル全体をより円形に近づけ地山からの荷重に対する安定性を確保しようとするものである。

しかし、この場合インバート部分の掘削と逆アーチ構造のインバートコンクリートの打設という新たな工程が加わり、掘削の手順は格段に複雑になる。またこの作業のための新たな設備の導入も必要となり、工費の増加だけではなく段取り替えのための追加工期が必要となる。

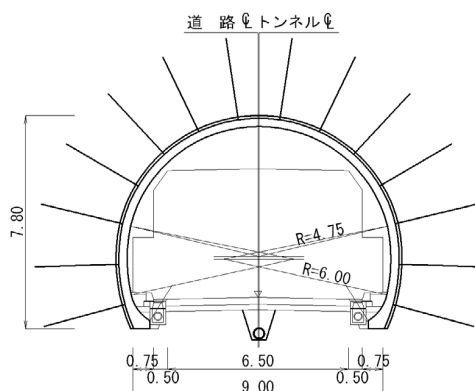


図6 C2の支保パターン

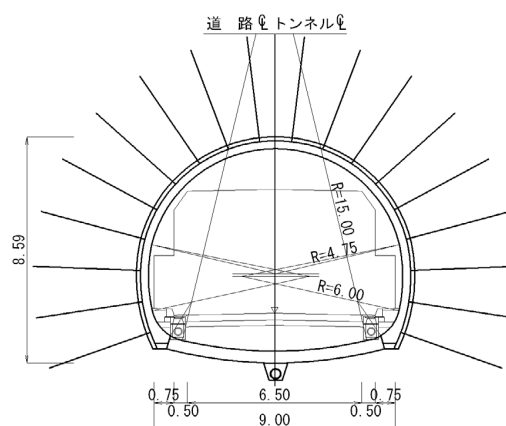


図7 D1の支保パターン

これに対して先進ボーリングを実施したトンネルの場合は、7%が1, 2段階悪くなるもののCからDへの変更は1.7% (=11/649) しかなく、施工途中での大きな工法変更がほとんどなかったことが判る。

すなわち先進ボーリングを行うことで掘削前に詳細な地山の地質情報が得られ、精度の高い地山分類を行うことが出来る。結果として施工中の工法変更が少なくなり、地山変位の増大を招くことなく施工を終えることが出来ると考えられる。

6. 先進ボーリングの費用対効果

先進ボーリングの地山評価における精度向上の効果は大きく、事前に実施できる変状の対策工として有効であると言える。とは言えトンネル全線にわたる先進ボーリングは多くの費用を必要とする。残る問題は、その費用対効果である。

亀村ら（2013）は、発破工法と機械掘削工法の掘削単価が示されている公表資料を参考にトンネル掘削費用を、また北海道開発局における実績を参考に先進ボーリングの平均的な費用を表5のように想定し、試算を行った。

事前調査に基づく地山等級通りの地山を掘削する場合は何らコスト増を生じないが、想定とは異なった地山に遭遇した場合には、支保の増減を必要とするだけでなく場合によっては工法の変更に伴う様々な段取り替えが必要となり、工程の遅延も生じる。ここではこうした地山等級の変更に伴う工事費の割増を表6のように想定した。

例えば発破掘削でC2からC1へ変更した場合、掘削単価は1,290千円から1,059千円の231千円減になるのではなく、C1の単価の5%増し、すなわち $1,059 \times 1.05 = 1,112$ 千円を必要とし178千円の減にしかならないと仮定した。一方、C2からD1へ変更

した場合には新たにインバートの掘削とコンクリート打設が加わり、大幅な段取り替えとなるため掘削単価は通常の50%増し、2,971千円になると仮定した。

表5 想定した工事費用（直接費+間接費）

(単価千円/m)					
パターン	B	C1	C2	D1	D2
A=70m ² 発破掘削	957	1059	1290	1981	2043
A=80m ² 機械掘削	-	1351	1472	1947	2016
先進ボーリング	59~63千円/m				

表6 支保パターン変更に伴う費用の割増率

変更後掘削 パターン		B	C1	C2	D1	D2
変更前 掘削パターン						
B	957	0	1.05	1.05	1.5	1.5
C1	1059	1.05	0	1.05	1.5	1.5
C2	1290	1.05	1.05	0	1.5	1.5
D1	1981	－	1.2	1.2	0	1.1
D2	2043	－	1.2	1.2	1.05	0

こうして設定した工事費を表3に示した各々の地山等級の実績に対して適用し、実際に生じた変更パターンの割合を乗じることによって地山等級毎の平均的な工事費を算出した。算出方法は以下のとおりである。

例えば、

施工区間総数 : N

事前調査結果 A パターン区間数 : n_A

B パターン区間数 : n_B

施工時に A から B へ変更した区間数 : n

工事単価 A パターン : C_A

B パターン : C_B

A→B 変更に伴う工事費の割増率 : α

とすると、事前調査結果の通りに施工できた場合の平均工事費 C は、

$$C = (n_A \cdot C_A + n_B \cdot C_B) / N$$

施工時にパターン変更があった場合の平均工事費 C^* は、

$$C^* = \{ (n_A - n) \cdot C_A + n_B \cdot C_B + n \cdot \alpha \cdot C_B \} / N$$
と計算される。

全ての掘削が発破工法によるとした場合の地山等級C1からD2までの算定結果を表7に示す。どの地山等級においても先進ボーリングによる評価を加えることによって工事費は減少する結果となっている。特にC1, C2, D2地山における工事費の低減効果は大きく、先進ボーリングの費用（59～63千円/m）以上の効果があることが判る。

この算定結果は、地山等級がC1, C2 からD1, D2へ変更になった時の掘削費用の割増率を1.5と仮定した場合であり、この仮定の妥当性が問題となる。しかし施工時の施工パターンの変更に伴うコスト変動の詳細なデータはない。そこでどのくらいの差があれば先進ボーリングの費用対効果が出るかについて、表6で1.5と設定していたB, C1, C2 からD1, D2へ変更した場合の工事費の割増率を1.05から1.7まで変化させ検討した。

各々の割増率に対して算定された地山等級ごとの工事費に対し、地山等級の数で加重平均した平均総工事費を求めた結果を表8と図8に示す。先進ボーリングを行うことによって工事費が低減でき、その差が先進ボーリングの費用を上回れば先進ボーリングの建設費低減効果があるということになる。図より先進ボーリングの工事単価を60

千円/mとすると割増率1.3で工事費の低減効果が出ることが判る。

このような結果となる理由について事前調査によって地山等級がC2と判定されたケースを例に説明する。表9は、事前調査によってC2と判定された区間の施工の経緯を示したものである。このように事前の地山評価でC2と評価された地山では、施工時にもC2の場合が84.9%（=2.9+73.5+6.4+2.1）で残り15.1%がD（D1:7.7%, D2:7.4%）へと変更になる。このため工事費増と

表7 先進ボーリングの効果

	(千円/m)			
事前調査により設定された地山区分	C1	C2	D1	D2
先進ボーリングにより変更し、施工した場合	1337	1438	1782	2243
事前調査結果により施工した場合	1437	1551	1835	2361
先進ボーリングの効果	-100	-113	-53	-118

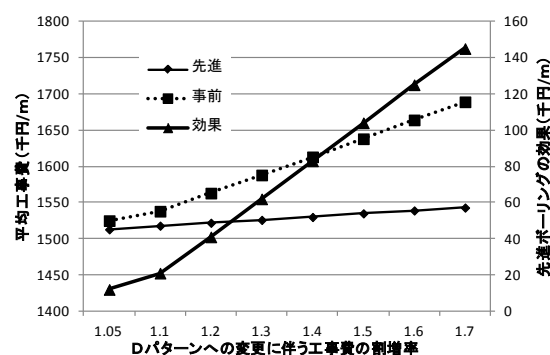


図8 先進ボーリングの効果と割増率

表8 Dパターンへの変更に伴う工事費の割増率と平均総工事費

	(千円/m)							
B、CパターンからDパターンへの変更に伴う工事費の増加率	1.05	1.1	1.2	1.3	1.4	1.5	1.6	1.7
先進ボーリングにより変更し、施工した場合	1513	1518	1522	1526	1530	1535	1539	1543
事前調査結果により施工した場合	1525	1538	1563	1588	1613	1638	1664	1689
先進ボーリングの効果	-12	-21	-41	-62	-83	-104	-125	-145

表9 事前評価でC2と判定された地山の施工結果

(数値は区間数)						
事前調査による 地山判定	先進Brによる 地山判定		割合(%)	施工時の評価		割合(%)
C2 377	C1	11	2.9	C2	11	2.9
	C2	281	74.5	C2	277	73.5
				D1	4	1.1
				C2	24	6.4
	D1	54	14.3	D1	22	5.8
				D2	8	2.1
				C2	8	2.1
	D2	31	8.2	D1	3	0.8
				D2	20	5.3

なり、C2 から D1 への変更に伴う段取り替えに要する追加費用の割増率が大きくなればなるほどその額は大きくなる。

これに対し先進ボーリングを行うと、事前評価でC2とされたものの内、22.5%がD（D1：14.3%，D2:8.2%）に再評価される。そしてD1と再評価されたものは施工時に44.4%(=24/54)がC2に、40.7%(=22/54)がD1に、そして14.8%(=8/54)がD2として施工される。したがって大幅な段取り替えを伴う支保パターン変更は生じない。これはD2と再評価されたものでも同様である。一方、先進ボーリングによってもC2と評価された74.5%は、その98.6%(=277/281)がC2として施工され、D1へと変更されたのはわずか1.4%(=4/281)に過ぎない。

すなわち先進ボーリングによってC2からD1あるいはD2と掘削前に見直されるため工事費は増加するものの、施工時のC2からDへの変更がほとんどないため追加費用の大きさの影響は見られず、グラフはほぼ水平となる。

ここで示したように、現行の基準等で設定されている標準支保パターンでは地山等級の変更に伴う工費の追加は避けようがない。特にそれがCからDへの変更の場合、インバートの掘削とインバートコンクリートの打設が新たに加わるため、掘削の段取り替えが非常に大掛かりとなり大幅な費用増となる。この場合、ある程度の費用を掛けてでも先進ボーリングを実施し事前に詳細な地質情

報を入手し、的確な地山分類を実施することでトータル工事費を抑制することが出来る。またそうすることで施工時の安全の確保が出来ることは勿論、予想外の地山に遭遇した場合の後手に回った変状対策により必要以上に地山を緩めるということも避けることが出来、そのメリットは大きい。

7. おわりに

ここでは、北海道の道路トンネルにおける先進ボーリング調査の結果を詳細に分析し、トンネルの設計・施工の基礎となる地質情報について検討した。

現在の山岳トンネルの標準工法となっているNATMの特徴である情報化施工においては、如何に信頼に足る地質情報を施工前に得るかが重要であるが、標準工法となってから20年以上の経験によっても、その精度は必ずしも満足できるものになっていない。

この問題を解決するためには、ここで示したようにトンネル全線にわたる先進ボーリングが有効である。勿論そのためには多くの工期と費用を必要とするが、現行の支保パターンを考慮すればトータルコストとしては十分に見合う成果が得られる。ただしここで注意しなければならないのは、トータルコストと言っているものは、一本一本のトンネル施工に対してではなく、ここでの検討のようにある地域、ある事業者の抱える複数のトンネルに対してであるということである。

このような考え方は、今はまだなじみのないものである。しかし、供用後長い時間を経た多くのトンネルの安全で合理的な維持管理が社会問題となっている現在、社会全体としてリスクをどう分担し、必要なものについてどんな対策を講じて行くのかという観点から取り組まざるを得なくなっ

ている。トンネル施工時の合理性の追求も同様であり、個々のトンネルではなく、事業者あるいは社会がどうやって合理的な社会資本への投資を行うことが出来るかを考えて行く必要がある。

したがって個々のトンネル工事において先進ボーリングの実施を判断するのではなく、北海道のように要領や指針により規定することが好ましい。この意味においてトータルとしてのメリットを評価するシステムが必要であり、学会などでの先進ボーリングの効果についてのより詳細な議論が望まれる。

この場合、一律に「先進ボーリングを実施する」とするのではなく、ここで示した北海道での事例をより詳細に分析し、先進ボーリングを行う方がいいケースの条件を明らかにする必要がある。例えば、弾性波探査の結果と実際の地山性状が合わないことが多いとされている付加体や膨張性地山、未固結地山等に対しては必須とするなどである。

一方で地質調査技術の高度化、これまでの施工実績の総合的な再評価による調査結果に基づく地山分類法の見直しなども積極的に行う必要があることは言うまでもない。

参考文献

土木学会：(2003) トンネルの変状メカニズム。
土木学会：(2007) より良い山岳トンネルの事前調査・事前設計に向けて、トンネルライブラリー，18。
亀村勝美：(2012) 供用後のトンネル変状リスクへの対策工の選定法について，第67回年次学術講演会，VI-109，217-218。
亀村勝美・稲垣大介・井尻裕二：(2010) 供用後のトンネル変状リスクへの対策工の選定法について，トンネル工学報告集，20，251-

258。

亀村勝美・岡崎健治・伊東佳彦：(2013) 変状トンネルへの対策工の選定法に関する研究-対策工としての先進ボーリングの効果について-，第13回岩の力学国内シンポジウム講演論文集，307-312。

亀村勝美・岡崎健治・伊東佳彦・佐々木博一：(2013) 山岳トンネルにおける先進ボーリングの効果に関する検討，第68回年次学術講演会。

日本道路協会：(2009) 道路トンネル観察・計測指針。

岡崎健治・伊東佳彦：(2011) トンネルの供用開始後に生じる変状と経時変化に関する考察，トンネル工学報告集，21，183-188。

岡崎健治・伊東佳彦・佐々木博一：(2011) 北海道における国道トンネル施工時の地質調査と効果に関する検討，第29回日本道路会議。