

トンネル地質調査における先進ボーリングの適用状況について

防災地質チーム

1. はじめに

2009年に道路トンネル観察・計測指針¹⁾が改訂され、新たに「前方探査」が明記された。同解説では、「トンネル地山における断層破碎帯等の不良地山区間の事前把握や事前調査の精度向上、補完を目的に、トンネルの切羽(トンネルの掘削面)から、その前方の地山の状況を積極的かつ事前に把握して、その情報を設計・施工に反映させることが重要である」と述べている。その主な前方探査の方法は、探りノミ、削孔探査(先進ボーリング調査を含む)および、弾性波を用いた物理探査手法である。

北海道の国道トンネルの建設では、施工中に先進ボーリングを原則全線で実施²⁾し、その結果(コア観察、速度検層、岩石試験等)と掘削に伴う変位量の計測結果を併せて、最終的な支保工パターンを決定している。一方、北海道の国道以外のトンネル建設現場では、事前の調査段階に坑口部の水平ボーリング調査を行うこともあるが、施工中にトラブル等が生じない限り、先進ボーリングを行うケースは少ない。

そこで本解説では、過去10年間における全国の切羽前方の調査事例として120事例を収集するとともに、適用例を手法別に分類した。そのうち、北海道の国道トンネルでの事例において、事前調査の地山分類(設計分類)と施工中の先進ボーリングの結果にもとづく地山分類(先進分類)が、施工時の地山分類(施工分類)と一致する割合を求めることで、先進分類の精度と有用性について分析したので報告する。

2. 切羽前方探査の事例分類

過去10年間の全国におけるトンネル切羽前方探査の事例について、文献検索システムJ Dream IIを使用し、「トンネル」と「前方探査」のキーワードで検索した。その結果、120の文献を抽出した。

まず、図-1に、切羽前方探査の手法別の分類数とその割合を示す。事例120件の中には、複数の手法を併用しているケースがあるため、総数は158件である。

分類の結果、切羽前方探査の手法^{3~4)}は、弾性波を用いた物理探査手法(弾性波反射法、弾性波トモグラフィ、高密度弾性波探査)、削孔探査、電磁波探査および先進ボーリングである。このうち、弾性波を用いた物理探査手法が全体の36%を占め、最も多く適用されていた。この手法は、従来から精度や実績との検証等、実用に向け試行された手法である⁵⁾。一方、先進ボーリングは、全体の9%を占め、3番目に多く適用されているが、コアを採取しない削孔探査と比べて適用は少ない。

次に、図-2に、年度別の切羽前方探査における手法別の分類結果を示す。年度別の切羽前方探査の適用の件数は、2009年の道路トンネル観察・計測指針改訂前後で大きな差はないが、2012年度の報告件数が最も多い。さらに、手法別の報告件数をみると、複数の前方探査を併用して地山分類を行っている事例も報告されているが、比較的採用された件数が多いのは、弾性波反射法(57件)と削孔探査(44件)である。そのうち、先進ボーリングは14件と適用数は少ないが、地山分類の他に、湧水処理対策に効果があることから、切羽の安定性や安全な施工性の確保に貢献度が大きいといえる。また、トンネル掘削前に、坑外から長尺のコントロールボーリング⁶⁾を実施するなど、湧水処理対策や地山評価が事前に行われるケースもある。

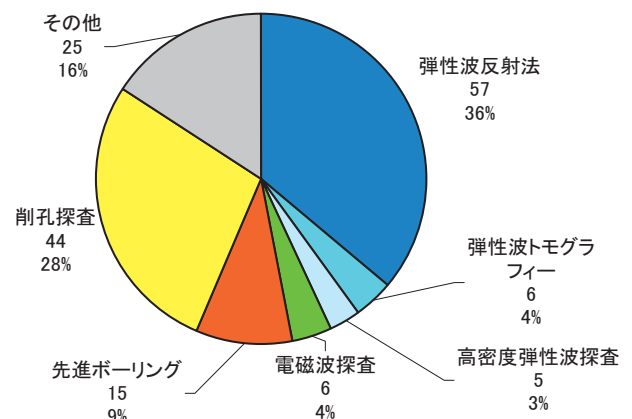


図-1 切羽前方探査の適用例における手法別分類と割合

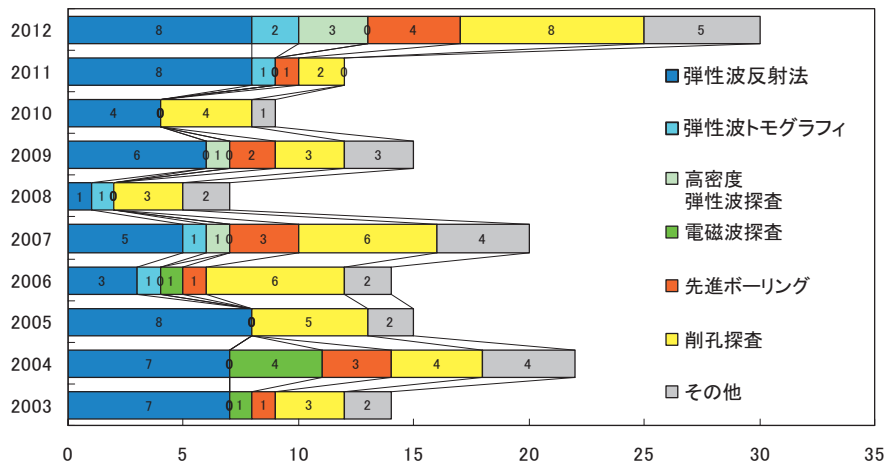


図-2 年度別のトンネル切羽前方探査における手法別の分類結果

3. 先進ボーリング調査と地山分類

3.1 先進ボーリング調査

先進ボーリングは、切羽前方の地山を直接確認できる有益な手法のひとつである。地質状況によって異なる場合もあるが、概ね100～120mの延長を2～3日かけて掘削する。その間、トンネルの掘削自体を休止するため、機械損料等が余分にかかる。このため、先進ボーリングの費用効果の適切な評価が重要となる。

以下に、先進ボーリングが、地山分類の精度向上に寄与するかどうか検討した。なお、施工分類は、切羽観察や変位量の計測データを含む最終的な評価であること、また、先進分類では、切羽前方の地質を直接確認できる等の違いを有することを前提とした。

3.2 地山分類の変更状況

国土交通省北海道開発局が施工した4つの道路トンネルにおける設計分類、先進分類を施工分類と対応して、地山分類の変更割合を分析した。

表-1、図-3に各トンネル(A～D)の延長と主な地質、地山分類における段階別の変更割合を示す。

各分類では、支保が構造的に軽減側へ変更した場合をマイナス、重増側に変更した場合をプラスとし、その乖離をランク別(例えば、2ランク変更が生じた場合を-2)に整理した。

その傾向は、次のとおりである。

1) 設計分類から施工分類への変更割合(設計から施工)は、マイナスが45%(-2が4%、-1が41%)、一致が39%、プラスが16%(+1が11%、+2が5%)であった。設計時に、地山を慎重に評価する傾向にある。

表-1 各トンネルの延長とおもな地質

トンネル	延長(m)	主な地質
A	1,792	中新世: 安山岩、火山角礫岩、石英安山岩、砂岩および礫岩
B	578	鮮新世～中新世: 凝灰質砂岩、火山礫凝灰岩、火山角礫岩
C	3,215	白亜紀: ホルンフェルス、珪質凝灰岩
D	4,110	白亜紀～ジュラ紀: 水冷破砕岩、チャート、玄武岩

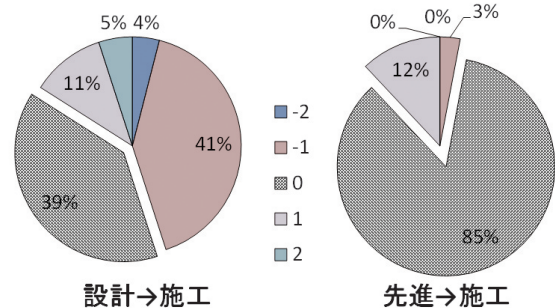


図-3 地山分類の段階別における変更割合

2) 先進分類から施工分類への変更割合(先進から施工)は、一致が85%と高く、マイナスが3%(-1で3%)、プラスが12%(+1で12%)で2ランク以上の乖離はない。これは先進ボーリングによる切羽前方の地山分類の精度が高いことを示している。

3) 設計から施工、先進から施工のそれぞれ一致した地山分類は39%と85%である。両者の割合の差は、46%となった。この割合の差は、先進分類により設計分類を効果的に修正し、先進ボーリングの情報が地山分類に有効に活用されていることを示している。

ただし、施工中には、切羽観察の結果や変位量の計測結果による地山分類が実施されており、今後は、これらとの対応を考慮し分析する必要がある。

3. 3 先進ボーリング調査の費用効果

先進ボーリングは、地山分類に有効であるが、その分の調査コストの増加を生じる。一方、先進ボーリングを実施しなかったために、予期せぬ地山の地質状況の急変に遭遇し、縫い返しや掘削の休止等、地質リスクに由来するトラブルによって、コスト増が余儀なくされる場合がある^{7~8)}。

先進ボーリングを実施すべきかどうかの判断は、先進ボーリングの調査コスト自体と地質トラブルによるコスト増のどちらが、より大きいかによって決まる。

例えば、延長1 kmのトンネルは、特殊な地質を除いて、通常30～40億円程度で建設される。この場合、延長1 km全線で先進ボーリングを実施する費用が5千万円(5万円/m)程度とすると、先進ボーリングを実施しなかったことで生じるトラブルに5千万円以上かかるようであれば、先進ボーリングを実施した方が良かったことになる。

特に先進ボーリングが大きく貢献していると考えられるのは、突発的な大量湧水の予見である。例えば、Dトンネルでは、施工時に湧水が2箇所(3,000ℓ/分、100ℓ/分)で発生し、特に湧水量が多かった1箇所では対策のために工事がおおよそ1週間中断している。

この他にも先進ボーリングは、縫い返し回数の減少にも貢献していると考えられる。Dトンネルでは、縫い返しが4箇所(総延長77.8m)で発生しているが、先進ボーリングを実施していなければ、より多くの縫い返しが発生していた可能性もある。

以上のような事態を、先進ボーリングでの予測によって回避でき、そのコストの縮減が大きければ、先進ボーリング実施のメリットは十分にあるといえる。

4. おわりに

地質が複雑で施工上のリスクを高める可能性がある場合には、先進ボーリングで、事前にそれを回避、軽減することができる。ただし、熱水変質作用を受けた火砕岩類や蛇紋岩を地山とするトンネル建設では、先進ボーリング、膨張性の判定⁹⁾ならびに施工計測の結果に基づいた地山分類で施工しても、盤ぶくれや押し出し等の時間依存性を有する変状が生じる場合もある。そのため、このような特殊な地質条件でのトンネル建

設における評価方法を構築することも重要といえる。一方では、先進ボーリングを実施すると、その調査コスト以外に、掘削の一時休止に伴う機械損料等のコストが生じる。このため、トンネル設計時の地質調査において、より精度が高く、現場条件に合致した物理探査手法を適用することで、必要最低限の先進ボーリングを実施すべき箇所を抽出する等の対応を組み合わせることも必要である。場合によって、先進ボーリングを省略し、工期短縮や工費節減に努めるための検討も必要であり、安全側へ配慮し過ぎることでのコストの増加をどのように考えるかが課題である。

今後は、地質に応じた調査研究を行い、より安全で経済的なトンネルの地山評価法を提案していきたい。

最後に、本解説の執筆にあたり、国土交通省北海道開発局ならびに北海道土木技術会トンネル研究委員会から資料の提供や現地調査にご協力いただいた。ここに記して、関係各位に厚くお礼申し上げる。

(文責：岡崎 健治)

参考文献

- 1) 道路トンネル観察・計測指針：日本道路協会、2009.2.
- 2) 道路設計要領第4集トンネル：国土交通省北海道開発局、2013.4.
- 3) 物理探査用語辞典：物理探査学会、2005.5.
- 4) 大島洋志：わかりやすい土质地質学：土木工学社、2007.4.
- 5) 弾性波によるトンネル切羽前方調査法に関する共同研究報告書、トンネルH S P計測・解析マニュアル(案)：土木研究所共同研究報告書160号、1997.1.
- 6) 山岳トンネル先進ボーリング入門(6)－施工事例(1)：施工前に坑外から実施する地質調査ボーリッガー：トンネルと地下、第40巻、pp.55-66、2009.2.
- 7) 亀村勝美・岡崎健治・伊東佳彦：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、2013.1.
- 8) 丹羽廣海・村山秀幸・岡崎健治・伊東佳彦：トンネル支保パターン選定における切羽前方探査の活用効果についての検討、土木学会、第68回年次学術講演会講演概要集、2013.9.
- 9) 例えば、トンネル標準示方書、山岳工法・同解説：土木学会、2006.7.