

北海道におけるトンネル地山評価システムの高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（道路勘定）

研究期間：平 18～平 21

担当チーム：防災地質チーム，道央支所

研究担当者：伊東佳彦，阿南修司，岡崎健治，宍戸政仁，
高橋幸継，井上豊基，竹高秀幸

【要旨】

本研究は，トンネル地山の地質性状のより精度の高い評価システムを提案することで，計画時と建設時における地山評価の乖離を改善し，トンネル建設コストの増加防止に資することを目的とする。

本研究では，北海道の国道トンネル事業における地質工学情報を収集整理し，データベースを作成した。あわせて，広域かつ大深度の地盤性状の評価を目的とした地質情報の取得方法を確立するため，実際の長大トンネルの建設現場において地山深部を対象とした複数の電磁探査法を実施した。その適用性と効果を検証することで，トンネル地山深部の地質性状の評価に向けた調査の適用方法を提案した。

キーワード：トンネル，地質調査，地山評価

1. はじめに

道路トンネルの長大化にともない，計画時と建設時におけるトンネル地山評価の乖離とそれによる事業費の増大，工期の延伸などが従来以上に課題となっている。このため，地質調査を合理的に組み合わせた，より精度の高いトンネル地山評価法を構築・体系化することが求められている。

本研究は，トンネル地山のより精度の高い評価体系（システム）を構築・提案することで，トンネル建設コストの低減に資することを目的としている。以下に，本研究の研究成果の概要を報告する。

2. 年次計画と研究方法

本研究の年次計画を表-1に示す。以下，項目ごとに研究方法を述べる。

2.1 既存資料の収集および課題抽出と整理

北海道の国道トンネルの計画～建設時の地質工学情報を収集整理し，現状の地山評価の課題抽出に向けた検討を行った。

2.2 トンネル地質データベースの構築

トンネル建設コストの縮減，安全施工，供用後の維持管理および新たな事業計画への有効活用を目的として，前節で収集した地質工学情報のデータベースを作成した。

2.3 現場における各種計測データの対比と適用性検討

長大トンネルを対象として，その調査，設計および建設時の地質調査成果，各種計測データを整理し，トンネル掘削にともなう地山挙動について検討した。

2.4 空中物理探査結果を加味した地質工学情報と地山評価の統合

長大トンネルの計画ルート周辺を含む広域かつ地山深部の地質性状を，より精度良く把握するため，トンネル掘削前に複数の電磁探査法によって地山の比抵抗分布を求め，建設時に想定される地質的な問題点とその発生箇所を予測した。

2.5 施工時地山評価データの検討

トンネル建設時に得た地質状況，変位量，実際に

表-1 年次計画

| | 項目 | 18年度 | 19年度 | 20年度 | 21年度 | 備考 |
|---|-------------------------------|------|------|------|------|----|
| 1 | 既存資料の収集および課題抽出と整理 | ○ | | | | |
| 2 | トンネル地質データベースの構築 | | ○ | ○ | ○ | |
| 3 | 現場における各種計測データの対比と適用性検討 | ○ | ○ | ○ | ○ | |
| 4 | 空中物理探査結果を加味した地質工学情報と地山評価の統合 | | | ○ | ○ | |
| 5 | 施工時地山評価データの検討 | | | ○ | ○ | |
| 6 | 高度化されたトンネル地山評価システムの構築と活用方法の提案 | | | | ○ | |

生じた問題点と前節との対応関係を整理した。

2. 6 高度化されたトンネル地山評価システムの構築と活用方法の提案

前節までの検討結果を整理し、長大トンネルの地山深部における地質性状の評価に向けた調査の適用方法を提案した。

3. 研究結果

3. 1 既存資料の収集および課題抽出と整理

北海道の国道トンネル事業では、調査設計から施工段階の各種情報がトンネル管理システム¹⁾に蓄積され、建設時の地山分類の見直しや管理基準値を設定する際の参考資料として利用されている。しかし、これらの情報は、工事完成後において、事前の地質調査結果や施工計測データと検証されることが少なく、新たな事業計画や類似条件下の設計への活用に向けた再整理と分析が課題となっている。

本節では、これまで北海道で建設された国道トンネル(16トンネル、総延長 30,950m、計測断面 20,473)のデータと先進ボーリング調査(北海道の国道トンネルの建設時に原則全線で実施)の結果をもとに、設計時と建設時の変更割合を運用基準²⁾に示される岩種に応じて整理した(図-1)。

岩種別にみると「剥離性に富まない古生層～深成岩・火山岩」でのトンネル建設が62%と最も多い。

変更割合は、全体(全岩種)で「変更なし」が60%であり、各岩種でもこの割合に大きな差はなかった。

その内訳は、「支保増」が29%、「支保減」が11%であった。岩種別には、「剥離性に富まない古生層～深成岩・火山岩」で「支保増(設計で地山を過大評価)」となる比率が「剥離性に富む古生層～深成岩」、「第三紀堆積岩類」と比較して多いなど岩種に応じた傾向が認められ、地山分類において地質を区分す

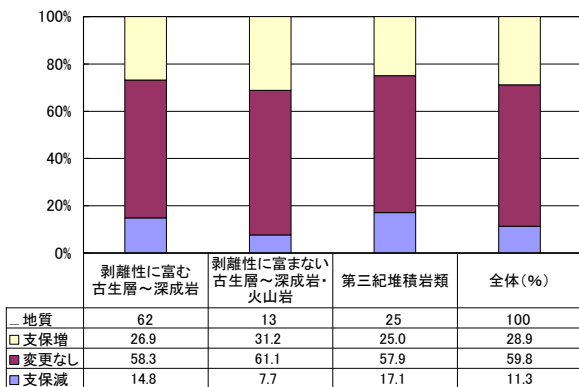


図-1 地山等級の変更割合³⁾

ることの有効性が確認された。

3. 2 トンネル地質データベースの構築

これまでの北海道の国道トンネルの事業では、事前調査から掘削段階の地質調査成果、施工計測データが蓄積されている。

本節では、新たにデータベース(北海道の国道トンネルに関する各種資料⁴⁾、トンネル諸元⁵⁾、国土交通省北海道開発局が運用するトンネル管理システム¹⁾のデータをもとに)を構築した。あわせて、トンネル地山の地質と地山等級の変更状況を整理した。

図-2, 3にトンネル建設箇所の主な地質(307トンネルのうち183トンネルのデータ)と岩種別の地山等級の変更状況(前述の16トンネル)を示す。

トンネル箇所の主な地質は、「火山岩」が52%、「第三紀堆積岩類」が18%、「剥離性に富む古生層～深成岩」が10%と全体の約8割であり、「剥離性に富まない古生層～深成岩」が17%と約2割である。

地山等級の変更状況は、前節での結果と同様に「剥離性に富まない古生層～深成岩・火山岩」で支保増(設計で地山を過大評価)となる比率が「第三紀堆積岩類」「剥離性に富む古生層～深成岩」に較べると多い傾向が確認された。

これまでの北海道の道路トンネルの建設で発生した施工上の問題とその対応について、北海道土木技術会トンネル研究委員会⁷⁾が116の事例(過去20年間)を整理している(表-2)。

これらの事例を地質別に整理すると、火山岩や第三紀堆積岩類の分布地域では、地山の膨張性が問題とされており、地質的課題の生じやすい地山に多くの国道トンネルが建設されているといえる。また変質帯や破碎帯の存在する区間では、変位量を抑制す

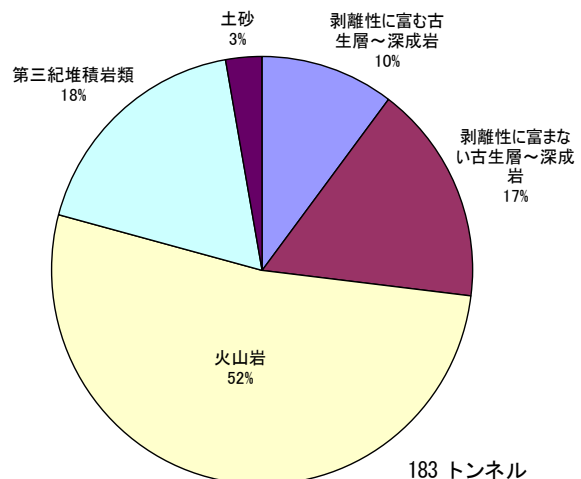


図-2 トンネル建設箇所の主な地質⁶⁾

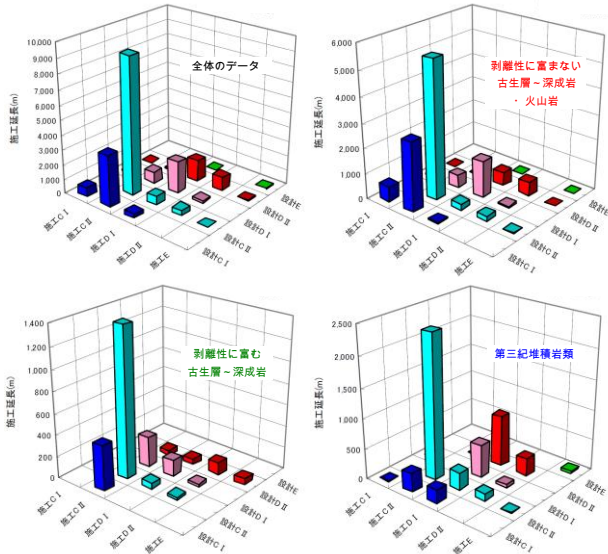


図-3 地質別の地山等級の変更状況⁶⁾

表-2 トンネル施工上の問題点⁷⁾

| 分類 | 細目 | 件数 |
|----------|---------|-----|
| 膨張性地山 | 破碎帯 | 7 |
| | 蛇紋岩 | 8 |
| | 変質帯 | 5 |
| 切羽崩落 | 破碎帯 | 2 |
| | 風化帯 | 3 |
| 湧水 | 未固結堆積物 | 1 |
| | 岩盤 | 7 |
| 未固結堆積物 | トンネル中央部 | 7 |
| | 坑口部 | 18 |
| 地すべり | 坑口部 | 2 |
| | 掘削工法 | 2 |
| 偏圧 | | 2 |
| 拡幅トンネル | | 6 |
| 分岐トンネル | | 5 |
| 周辺環境 | 地表面沈下 | 1 |
| | 振動・騒音 | 5 |
| | 振動 | 7 |
| | 重金属 | 2 |
| | 植生保護 | 1 |
| 施工全般・その他 | | 25 |
| 計 | | 116 |

るための対応やその挙動に応じた対策工法の適用など、難工事を強いられている。

剥離性に富む古生層～深成岩のうち蛇紋岩などの特殊な岩石の分布する地域では、地山の押し出し性の抑制に苦慮している。土砂地山など未固結堆積物の掘削では、湧水対策が生じるなど、地質の違いによって生じる問題が異なることを確認した。

3.3 現場における各種計測データの対比と適用性検討

北海道北見市北西部に位置する国道トンネルの建設現場を対象として、調査・設計ならびに建設時の地質調査成果および各種計測データを対比した。

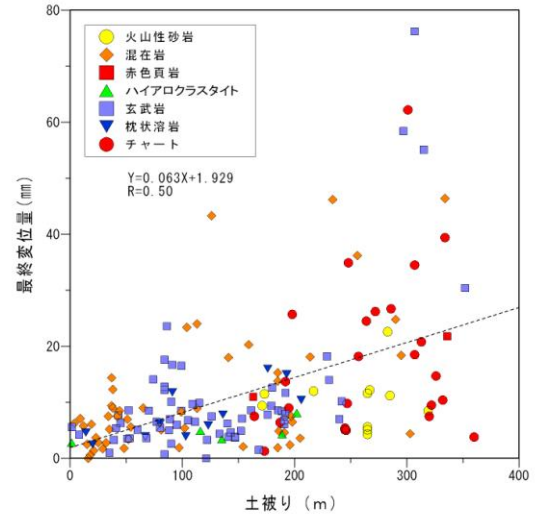


図-4 トンネルの土被りと最終内空変位量⁸⁾

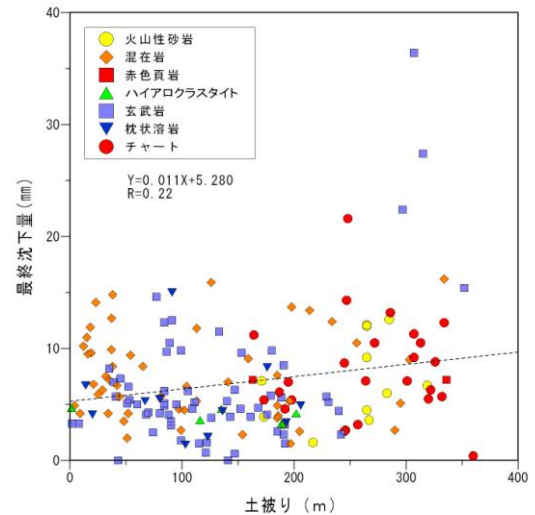


図-5 トンネルの土被りと最終沈下量⁸⁾

トンネル箇所は、緑色岩類および遠洋性の堆積岩類（枕状溶岩、チャートおよび石灰岩の混在岩）からなる白亜紀付加体である。また調査地周辺では、付加体形成時またはその後の構造運動により形成されたと考えられる断層が多数発達する。

本トンネルの事前の地質調査では、地山分類を目的とした地表踏査、ボーリングおよび屈折法弾性波探査が行われている。またトンネル工事では、先進ボーリング調査が全線で実施され、実際の地山の地質状況が確認されている。

本節では、本トンネルの各種計測データのうち、変位量と土被りの関係を地質別に整理した。

図-4、5にトンネルの土被りと最終内空変位量、最終沈下量の関係を地質別に示す。土被りと各変位量の相関係数は、0.50、0.22と比較的低いが、概ね比例する傾向が認められる。

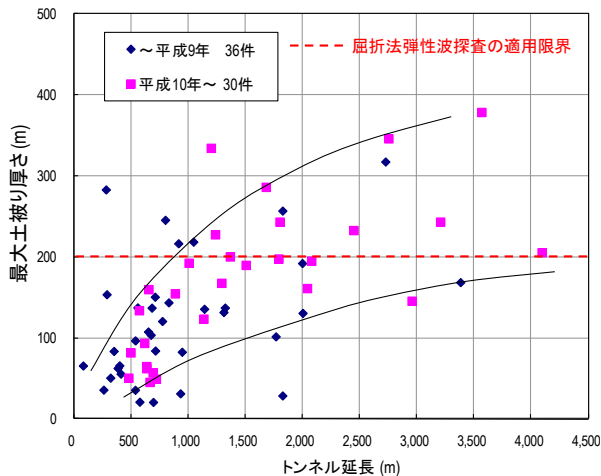


図-6 トンネルの延長と最大土被り厚さ⁶⁾

最終内空変位量は概ね 20mm 以下を示すが、土被りが 100m を超えると 20mm 以上の値を示す場合の多いことが確認できる。このうち玄武岩、混在岩およびチャートでは、とくに土被りに比例して最終内空変位量が大きくなることが確認できる。

最終天端沈下量は概ね 15mm 程度を示すが、玄武岩やチャートで、同様に土被りが大きくなると最終天端沈下量も大きくなる。また地質に応じた違いを確認することができる。このように土被りの大きい地山深部では、変位量が大きく、かつ地質別に違いを有することが確認された。

図-6 に最近 20 年間における北海道の国道トンネルの延長と最大土被り厚さの関係を前半 10 年(～平成 9 年)と後半 10 年(平成 10～)に分けて比較した結果を示す。

トンネル延長が 1km 以上の場合、後半 10 年で、その建設件数が増加している。またトンネル延長に比例して、最大土被り厚さも大きく、延長が 1 km を超えると最大土被り厚さが概ね 200m を超える傾向にある。また後半 10 年では、最大土被り厚さが百数十 m を超えるトンネルが増えている。

トンネルの地質調査で一般に実施される屈折法弾性波探査の適用限界⁹⁾は 200m 程度とされ、より土被りの大きな地山では、地表からの探査深度(調査可能な範囲)に限界を有すると考えられ、調査精度の信頼性は低い。そのため広域(計画ルートを含む周辺の情報を加味する範囲)かつ地山深部の地質性状を、より精度良く合理的、経済的に把握する方法の確立が重要といえる。

3. 4 空中物理探査結果を加味した地質工学情報と地山評価の統合

トンネル計画ルートとその周辺および地山深部の地質性状を把握するため、空中電磁法ならびに CS AMT 法¹⁰⁾(Controlled Source Audio-frequency Magnet Telluric method: 人工信号源可聴帯域地磁気地電流法)による電磁探査法を実施した。通常、電磁探査法に限らず、物理探査の結果は、地質技術者による調査結果を外挿または得られる物理量の分布や変化から地質構造を推定するために活用されている。

本節では、これらの電磁探査法の組み合わせから地山深部の比抵抗分布を求め、建設時に想定される地質的な問題点と発生箇所(以下、予測箇所)を施工前に予測した。

図-7 に本トンネルの各種調査結果の比較図を示す。図-7 (a)～(d)は、事前の地質調査(地表踏査、ボーリングおよび屈折法弾性波探査)による地質断面図、空中電磁法と CS AMT 法の組み合わせによる比抵抗断面図、建設時の先進ボーリング調査で判明した地質状況、トンネルの変位量を示す。ここで、空中電磁法と CS AMT 法の組み合わせについては、前節のとおり、広域かつ地山深部の地質性状を、より精度良く把握するために実施したものである。

図-7 (b)の①～⑤が、比抵抗分布から推定した予測箇所である。この 5 地点は、比抵抗が変化(高い値(寒色)から低い値(暖色)に変化)する区間(①, ②, ③の一部, ⑤)、高い値が分布するなかに低い値が混在する区間(④)および低い値が分布する区間(③の一部)として抽出した。一般に広義として、比抵抗は電気抵抗であり、水分や粘土分が多い場合、電流が流れやすい(抵抗が低い)という点を地質性状の解釈に利用している。

図-7 (a)の地質断面図と比較すると、⑤付近の沢地形部を除き、比抵抗の高い分布は概ね地質 M～B の分布に対応し、低い値の分布は概ね地質 P に対応する。また、地質断面図に示される地層の傾斜よりも緩やかな傾斜を有する地質構造であることが想定される。

各予測箇所での問題点として、①, ②, ③の一部および④では、地質構造運動にともなう岩盤の破砕または粘土化による変位量の増加や湧水の発生、③の一部と⑤では、主に風化部または地層境界の存在による変位量の増加や湧水の発生が想定された。

3. 5 施工時地山評価データの検討

施工時の地山評価データと予測箇所との対応について検証した。

本節では、トンネル建設時に判明した地質(先進

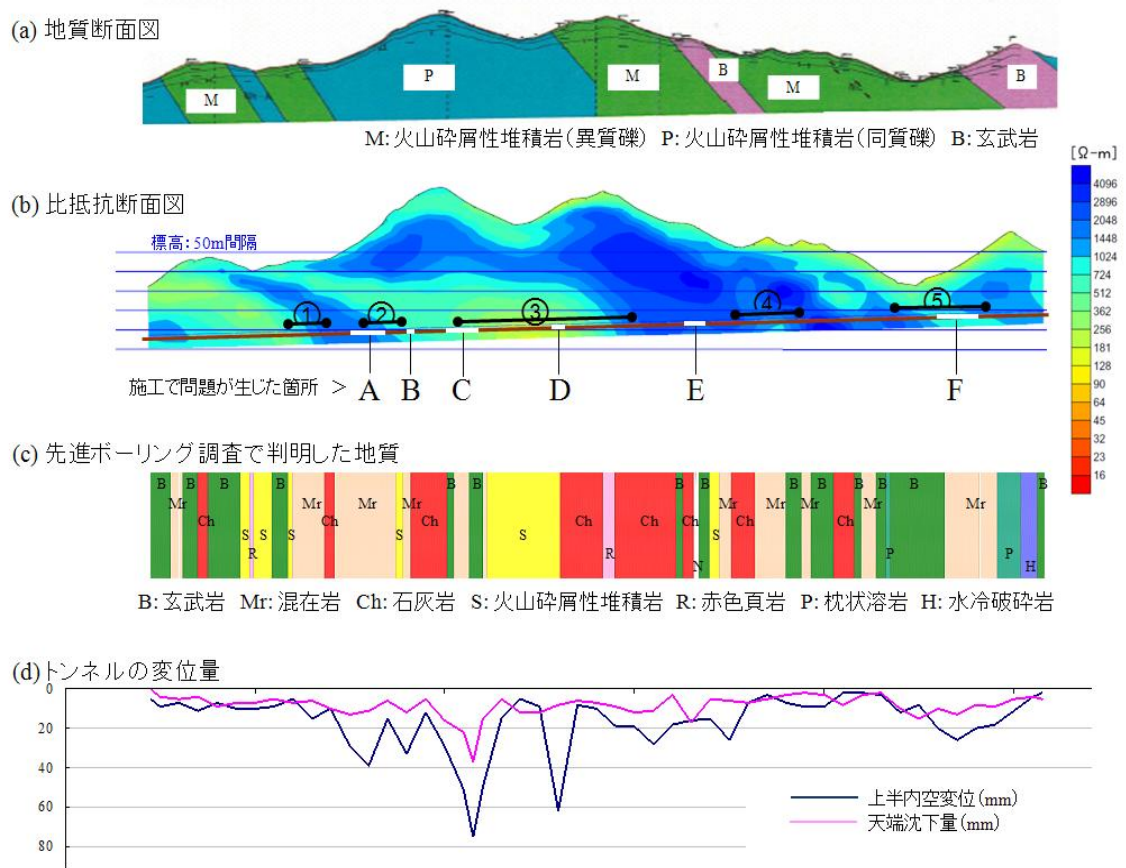


図-7 トンネル地山深部の調査結果の比較¹⁾

表-2 トンネル掘削で判明した地質状況と施工で生じた問題点¹²⁾

| 地点 | 主な地質 | 施工に生じた問題 | 対策工 | 支保工の変更状況 | 地山比抵抗 (読み取り値) | 推定した地質との対応 |
|----|--------------|--|----------------------|------------------------|------------------|------------|
| A | 混在岩 | 変位量の増加 天端沈下 ~13mm 内空変位 ~48mm 吹き付けCoにクラック発生 ロックボルトプレート変形 | 増しボルト | C II → C II + インバート | 1448 ~2048Ω m | ②と一致 |
| B | 混在岩 ~チャート | 変位量の増加 天端沈下 ~12mm 内空変位 ~40mm 吹き付けCoにクラック発生 ロックボルトプレート変形 | 増しボルト 縫い返し | C II → C II + インバート | 724 ~1024Ω m | ②と一致 |
| C | 混在岩 | 変位量の増加 天端沈下 ~35mm 内空変位 ~76mm 吹き付けCoにクラック発生 ロックボルトプレート変形 湧水の発生(3000L/分) | 増しボルト 縫い返し | C I → D I | 362 ~512Ω m | ③と一致 |
| D | チャート | 変位量の増加 天端沈下 ~12mm 内空変位 ~61mm 吹き付けCoにクラック発生 | 増しボルト 縫い返し | C I → C II + インバート | 181 ~256Ω m | ③と一致 |
| E | チャート ~玄武岩 | 変位量の増加 天端沈下 ~21mm 内空変位 ~34mm 天端崩落 吹き付けCoにクラック発生 ロックボルトプレート変形 湧水の発生(100L/分) | 増しボルト 縫い返し 先受工 | C I → D II | 1448 ~2048Ω m | ④の近傍 |
| F | 玄武岩 ~混在岩 | 変位量の増加 天端沈下 ~17mm 内空変位 ~42mm | なし | C I → C II + インバート | 724 ~2048Ω m | ⑤と一致 |

ボーリングコアの観察により地質を区分), 変位量を整理するとともに, 予測箇所と実際の建設時に生じた問題点とその発生箇所 (以下, 発生箇所) との対応状況について整理した。

図-7 (b)に示す A~F において, トンネル建設時に問題が生じた。表-3 にトンネル建設時に発生した問題点などの内訳を示す。

A~F では, 変位量の増加, 吹き付けコンクリートのクラック発生, ロックボルトのプレート変形および湧水の発生などの現象が生じた。とくに低い比抵抗が分布する C と D では, 変位量が他の地点よりも大きく, 多量の湧水も発生している。そのためロックボルトの増し打ちや縫い返し (再掘削) などの対策が行われるとともに, 支保工も構造的上位に変更されている。また, 高い比抵抗が分布する E 付近では, 変位量の増加, 吹き付けコンクリートのクラック発生, ロックボルトのプレート変形, 湧水の発生のほか, 天端崩落が発生している。この区間はより亀裂が発達する区間であり, 支保工が 3 ランク構造的上位に変更されている。

これらの発生箇所と予測箇所との対応を比較した場合, A と B は②, C と D は③, F は⑤に概ね対応する。また④は, 建設時に天端崩落が発生した E の近傍であり, 概ね予想した箇所またはその近傍で問題が生じるという結果であった。

発生箇所は, 概ね比抵抗分布が, 高~低または低~高に変化する箇所に対応する傾向が認められた。

次に, 建設時に確認したトンネル掘削箇所の地質と比抵抗分布および発生箇所の対応を比較した。

比抵抗分布と地質には, 比抵抗分布が高>低の関係に対し, 地質は Mr~Ch>B>S の傾向がみられる。発生箇所と地質の対応は, 発生箇所 B~E が地層境界に対応し, とくに C と D では変位量も大きい。発生箇所 F は, 沢地形の風化部に対応する。発生箇所 A は, Mr の分布に対応するが, その分布のなかの地質的な差異によって問題が生じたと想定される。

これらのことから, 地山深部を対象とした電磁探査法で推定した予測箇所と発生箇所は, 大局的に一致する傾向を確認でき, トンネル深部の地質評価法として効果があるといえる。

3. 6 高度化されたトンネル地山評価システムの構築と活用方法の提案

これまでの検討結果を整理するとともに, トンネル地山深部における地質性状の評価における調査の流れを体系化し, 活用に向けた適用方法を提案した。

図-8 に調査体系のフロー図を示す。トンネル地山の土被りが大きい場合, 深部を対象とした調査法で地質性状を評価することが合理的である。そのためフロー図では, 土被り厚さが 200m 以上の場合, 地山深部の地質情報の取得に適した手法を選定して調査することを明確化した。ここで「地山深部の評価が可能な手法」とは, より深部を対象とした物理探査法, 鉛直の長大ボーリング, 複数の手法を組み合わせた調査などをいう。しかし, 既存資料で地山の地質状況が推定できる場合, 比較的均質な地質や構造が推定できる場合, 規模が小さい場合などは, 適宜それらの条件を勘案して, 従来の手法による調査を実施することが合理的である。

図-9 にトンネルの規模に応じた物理探査法の適用のイメージ図を示す。土被り厚さが小さく (百数十 m 以下), トンネル延長が比較的短い場合, 従来の手法 (屈折法弾性波探査, 地質状況によって電気探査法を併用) で十分である。また, 土被り厚さが小さくてもトンネル延長が大きい場合, 空中電磁法が合理的となる場合も考えられる。なお, トンネル延長に関わらず土被り厚さが大きい場合, CSAMT 法などの電磁探査法の優位性が増すと考えられる。

計画時の地山評価と施工実績に乖離や不整合が発生する要因については, ①調査内容と調査量の不足, ②大きな土被り厚さかつ複雑な地質構造による調査能力の限界, ③調査技術者の能力的問題, ④計画~調査~設計の情報伝達不足が指摘¹⁴⁾されている。これらの要因の改善も今後の課題といえる。

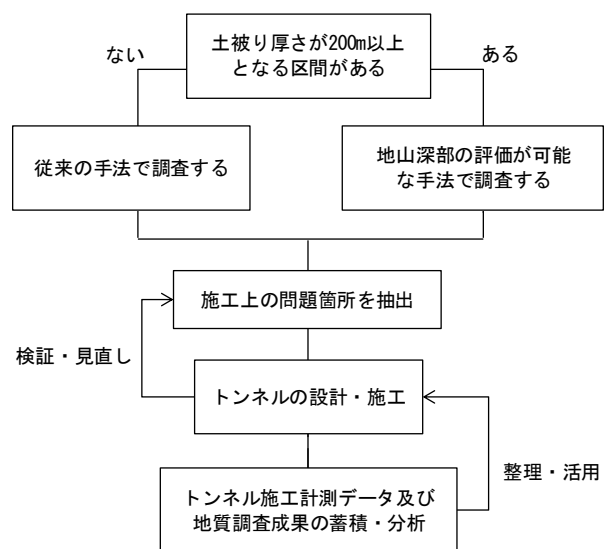


図-8 評価体系のフロー図

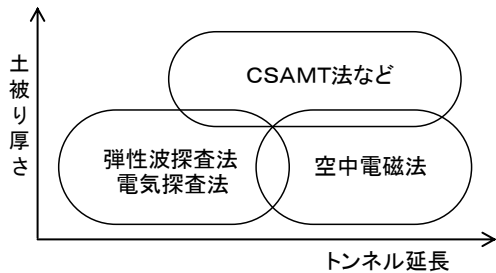


図-9 物理探査法適用のイメージ¹³⁾

4. まとめ

本研究では、北海道の国道トンネルの計画～建設時の地質工学情報を収集整理し、現状の地山評価の課題抽出に向けた検討を行った。あわせて、北海道の付加体地域で建設された土被りの大きな国道トンネルの地質調査において、地山深部を対象とした電磁探査法を実施し、施工上の問題点を予測するとともに、トンネル掘削で判明した地質状況と実際の建設時に生じた問題点を比較して、電磁探査法の効果と有効性を確認した。

トンネルの建設では、計画や事前調査の段階における地質情報量の多少が、その後の施工に与える影響が大きい。そのため、蓄積したデータの整理、分析を通じて、施工に際して、大局的な地質情報を事前に認識することが必要不可欠である。また近年のトンネル建設では、トンネルの長大化、大深度化にともない、地山深部の地質性状を事前に精度良く把握することが難しくなっている。そのため、トンネル地山深部の地質性状をより精度良く評価するには、調査目的や規模に応じた調査または物理探査手法を選定することが重要であり、場合によっては、複数の手法を組み合わせることで、地質解釈に有効な情報を導き出せる場合がある。

最後に、本研究の実施にあたり、現地調査への協力ならびにトンネル事業に関する各種資料を提供していただいた北海道開発局の各開発建設部、また本研究のとりまとめにあたり有益なご助言をいただいた北海道開発局建設部道路建設課の関係各位に、ここに記して厚くお礼申し上げます。あわせて、トンネル現場での調査ならびに掘削時のデータ整理にあたりご指導いただいた国立大学法人愛媛大学大学院理工学研究科の榊原正幸教授（共同研究「トンネル地山の地質工学的評価に関する研究」の実施相手機関）にお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 津田隆幸・高倉 司・遠藤真一・長谷川 功：トンネルデータベースと現場管理システム～開発局におけるトンネルデータ蓄積の現状と利用法～，'94 トンネル技術の特別講演と技術研究発表会論文集，pp.40-47，平成 7 年 2 月
- 2) 北海道開発局道路設計要領・トンネル，平成 21 年 4 月
- 3) 岡崎健治・伊東佳彦・掛田浩司：北海道の国道トンネルにおける地質情報と施工計測データの分析，土木学会，第 63 回土木学会年次学術講演会概要集，pp.307-308，平成 20 年 9 月
- 4) 北海道土木技術会トンネル研究委員会：北海道の道路トンネル第 1～3 集，昭和 63 年・平成 5 年・平成 17 年
- 5) 国土交通省北海道開発局：橋梁・トンネル・立体横断施設・覆道等現況調査，平成 18 年 4 月
- 6) トンネルにおける地質的課題（1）～現状と課題，トンネルデータの活用，および完成後の変状～：寒地土木研究所月報，第 672 号，pp.21-26，平成 21 年 5 月
- 7) 北海道土木技術会：トンネル研究委員会会報，No.40，pp7-13，平成 18 年 3 月
- 8) 岡崎健治・伊東佳彦：先進ボーリングの地質情報を考慮したトンネル変位予測方法の検討，土木学会北海道支部平成 20 年度年次技術研究発表会論文報告集，第 65 号，平成 21 年 2 月
- 9) 物理探査学会：物理探査適用の手引き（とくに土木分野への利用），pp17-20，平成 12 年 3 月
- 10) 例えば，物理探査学会：物理探査ハンドブック 第 6 章，電磁探査，pp.358-363，平成 10 年
- 11) 岡崎健治・日外勝仁・伊東佳彦・藤岡博之：電磁探査の複合解析によるトンネル地山の地質分布状況の推定，物理探査学会 118 回学術講演会，pp.232-235，平成 20 年 5 月
- 12) 岡崎健治・日外勝仁・伊東佳彦：土被りの大きなトンネルの地質評価における電磁探査法の適用性に関する検討～空中電磁法・CSAMT 法・両手法の組み合わせによる推定地質の検証～，物理探査学会 119 回学術講演会，pp.121-124，平成 20 年 10 月
- 13) トンネル建設における地質的課題（2）～計画・調査段階における物理探査法～：寒地土木研究所月報，第 673 号，pp.36-40，平成 21 年 6 月
- 14) 土木学会関西支部：地盤の可視化とその評価法，平成 17 年 10 月