

沢部を横断するトンネルの事前調査

GEOSCIENTIFIC SURVEY FOR EXCAVATING A TUNNEL UNDER A RIVER

赤澤正彦¹⁾・磯谷篤実²⁾・須澤浩之¹⁾

Masahiko AKASAWA, Atsumi ISOGAI and Hiroyuki SUZAWA

The object of this study is to consider the process and interpretation of the results of geoscientific survey regarding construction of a tunnel under a river. It is necessary to understand faults, fractions, weathering and hydrological conditions, particularly intrusion of river water for excavating tunnel safely and efficiently. The survey consisted of several methods including geophysical survey and drilling. A series of such surveys carried out prior to excavation enabled appropriate decisions regarding the construction through zones in need of particular care.

Key Words: geoscientific survey, fault, fraction, weathering, hydrological condition

1. はじめに

東北新幹線(八戸～新青森間)で建設中の八甲田トンネル(延長 26,455m)には、一級河川高瀬川水系小坪川の直下を土被り約40mで通過する区間がある(図-1, 2)。また、この区間には、断層の可能性があると考えられるリニアメントが抽出されるため、断層粘土の介在、亀裂性岩盤の存在、および河川水の浸透などの懸念が考えられた。このような場合、当該地域における地層の分布、それらの各層における亀裂の有無、風化の度合い、および透水性などの詳細な地質・水文状況を事前に調査しておくことが安全な施工を行うにあたって重要となる。

通常、掘削前の地質調査は鉛直ボーリングおよび弾性波探査などによることが多いが、今回、当該区間は地質構造が複雑であると予想されることから、複数の地質調査法を組み合わせるさまざまな角度から地質構造を考察し、的確な施工方針の策定に反映させることにした。

本報告はまず既往調査による地質の概要について述べ、既往調査をもとに、追加した地質調査の方針および実際に調査した結果を踏まえた全体的な地質状況の予測を述べる。最後に当該区間の施工方法について検討した結果を述べ、掘削実績による切羽状況と比較し、地質調査の過程およびそれによる判断の妥当性を評価する。



図-1 八甲田トンネル位置図

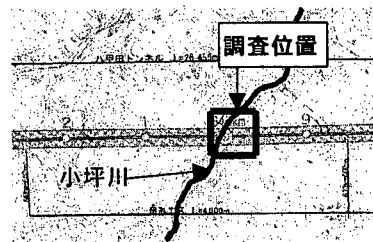


図-2 調査箇所位置図

- 1) 正会員 日本鉄道建設公団盛岡支社七戸鉄道建設所
- 2) 正会員 日本鉄道建設公団盛岡支社工事第三部工事第四課

2. 地質概要と調査の方針

図-3に地表踏査、ボーリングおよび弾性波探査によるトンネル計画時の既往調査から作成された地質縦断面図を示す。これによると、小坪川周辺の地質は新第三系中新統の主として火砕岩からなる和田川層が分布し、小坪川周辺では安山岩が和田川層に貫入する。また、川沿いにおいては安山岩貫入岩体の上部に砂礫からなる段丘堆積物が堆積している。また、その後の調査により、河床部においては一部泥岩が露頭していることが観察された。

泥岩層はこれまでの同工区の掘削実績から膨圧が発生し、支保の変形などが見られるため注意が必要と考えられる。また、リニアメントが存在すると見られることから、泥岩の分布、岩盤の亀裂・風化を三次元的に把握することが求められた。しかし、地表からのボーリングによって空間的な地質の情報を得るには多数の調査が必要となり、経済的・時間的な観点での効率性に問題がある。従って、地表からの調査で空間的な地下構造が概査できる物理探査と併用するなど一種類ではなく複数の手法を適切に組み合わせることで、効率的かつ的確に地下構造の情報を得ることとした。さらにボーリングによって岩盤の物性や透水性を計測し、同時にボーリング孔内と河川水の水質調査を行い、河川水がトンネル掘削によって導水する可能性を評価した。

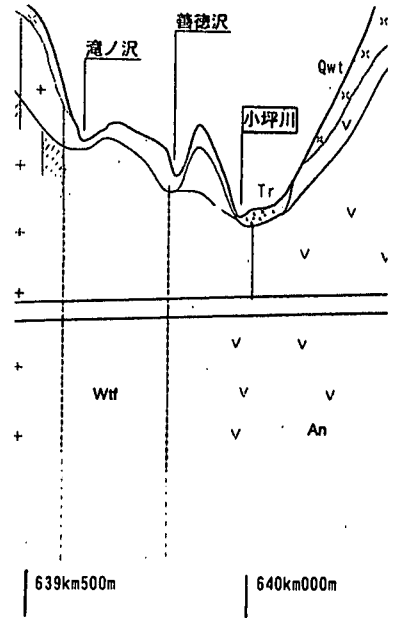


図-3 地質縦断面図(既往調査)

Tr:段丘堆積層 Qwt:溶結凝灰岩
Wtf:和田川層凝灰岩 An:安山岩

3. 調査の流れ

図-4に今回行った調査の平面的な位置を示す。以下、調査を行った過程を述べる。

(1)電気探査

まず、岩相の推定、断層や破碎帯・変質帯の存在、帯水層の有無等を調べるために電気探査を行った。探査方法としては深度100m未満の地下における地質分布を、測定ピッチを小さく

することによって比較的精度良く調査することが可能な比抵抗二次元探査によった。二次元探査の特性から測線と垂直な方向への地質分布が複雑な場合、必ずしも精度の良好な結果が得られるとは限らないが、ここでは線路横断方向、すなわちリニアメント方向の地層は比較的連続性があると考えられたことから、この方法で十分な精度が得られると判断した。また本地域は泥岩と安山岩が分布し、それぞれ異なる比抵抗値を示すことから岩相分布を把握するのに適切であると判断した。探査は1測線で行い、線路縦断方向に延長380m、5mピッチ(河床部は2.5mピッチ)で地中の比抵抗値を測定した。なお、探査結果は比抵抗値分布の断面図を作成することによって可視化し、地質構造における問題点を視覚的・空間的に示すことができる。

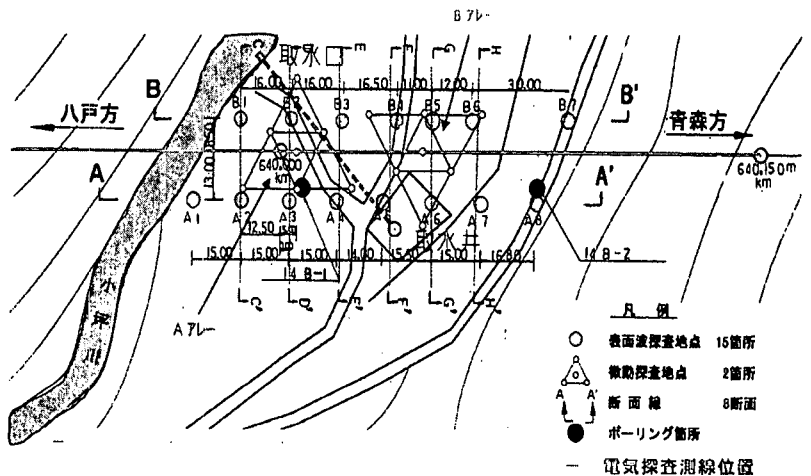


図-4 調査位置平面図

これにより得られた比抵抗値分布と地質固有の比抵抗値を対応させて解釈した断面図を図-5に示す。トンネルレベルにおいては小坪川を通過した東京起点 640km000m から 640km100m までの間に凝灰岩・泥岩または安山岩変質帯があると判断した。また、段丘堆積層の下に存在する高比抵抗値部に関しては河床砂礫と安山岩の2通りの可能性があり、河床砂礫の場合は河川水の導水や天端の安定性に影響が出ると考えた。

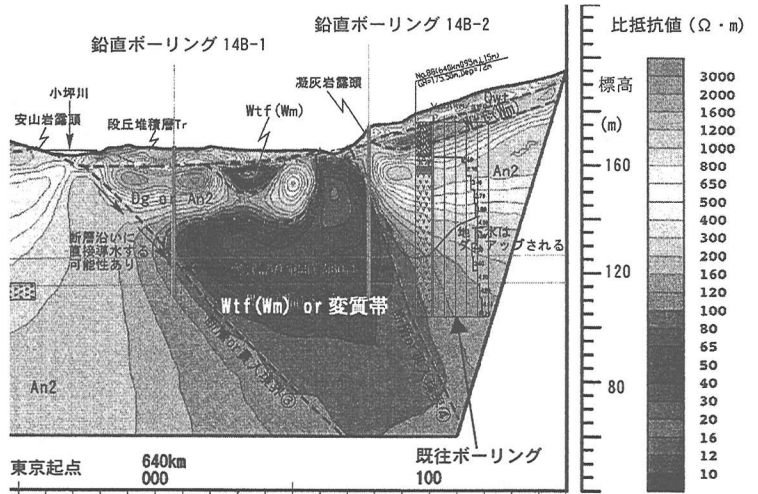


図-5 比抵抗値分布断面図(既往ボーリングの結果も含む)

Tr: 段丘堆積層 Qwt: 火山噴出物 Dg: 旧河床礫層

Wt f (Wm): 和田川層凝灰岩(泥岩) An2: 貫入岩安山岩

(2) 鉛直ボーリング

次に、電気探査の結果から地下深部の地質や物性をより精密に把握する必要があると認められた 640km007

m 地点 (14B-1) および 640km078.5m 地点 (14B-2) の 2 箇所において鉛直ボーリングを行った。鉛直ボーリングは①電気探査から予測された安山岩と凝灰岩(または泥岩)との境界部分における断層・亀裂・風化の状況の把握、②段丘堆積層の下部に示された高比抵抗値部の地質の確認、③湧水圧測定やP S検層といった孔内試験ならびに一軸圧縮試験や超音波速度試験などによる岩石試験を行うことによる岩盤の物性や透水係数の測定、④小坪川との水質比較による河川水導水の可能性の検討、の4点を調査することが目的である。

この鉛直ボーリング調査で明らかになった地質柱状図を図-6に示す。これによると 14B-1 では地表面から順に段丘堆積物、安山岩、泥岩が分布している。また、14B-2 では同様に崖錘堆積物、段丘堆積層、そしてその下に安山岩、泥岩が互層している。このことから、段丘堆積層の下部における高比抵抗値を示す部分は安山岩であると判断した。

湧水圧試験から透水係数を求めた結果、14B-1 では高透水性が、14B-2 では難透水性が示され、トンネル起点方においては施工時の湧水に対し注意が必要であると考えた。また、双方のボーリング孔内湧水の水質は、河川水とは異なっていた(塩素イオン分析等による)。しかし、トンネル掘削によって地下水の動水勾配等の状況が変化しないとも限らないため、14B-1 の付近で河川水が導水する可能性は否定できない。そのため、トンネル施工時において湧水した場合、水質の変化について注意深く観測する必要がある。なお、鉛直ボーリングの結果からは、電気探査の結果から推定した位置に断層を認識できなかった。よって、さらに風化帯の有無等についてより詳しいデータを得るため、空間的な調査を行い、これまでの調査結果をフィードバックさせ、地質状況把握の深度化を図ることが必要であると判断した。

(3) 表面波探査・微動探査

電気探査は1測線のみ、つまり1断面における計測としたが、3-(2)節で述べたとおり、さらに詳しい空間的情報が必要となった。そこで、電気探査を補完し、より詳細な地下構造を把握するため、高精度表面波探査および微動探査を行った。弾性波速度を用いた探査はP波によるものとS波によるものがあるが、本地域では河川水が地下に流れ込んでいる可能性があるため、地下水の状況および水質による影響を受けずに済むS波が適切である。また、高精度表面波探査法は高速度層の下に低速度層が伏在するという速度逆転層がある場合でも、ある程度の検出が可能であることから、これによることがふさわしいと判断した。今回

の土被り厚は高精度表面波探査が有効な探査深度である40mをわずかに超えているため、その補完として観測点1点における速度構造情報しか得られない代わりに探査深度をさらに深くすることのできる微動探査も併用し、両者の結果を合わせてS波速度構造断面図を作成した。S波速度構造は直接的に地下の状況を示すものではないが、それぞれの地質に固有な強度特性を反映していると考えられる。したがってボーリング等によって岩種が定めれば強度特性を推定することが可能であり、これにより地山の劣化状況などが判断できる。また、高精度表面波探査はトンネルセンターをはさんだ2測線で行い、それぞれを対比することにより空間的な地下構造の推定が可能である。

その探査結果から得られたS波速度構造断面図（トンネルセンター部）を図-7に示す。東京起点約640km000mの手前から約640km050mの間に速度逆転層が認められた。岩種に関しては鉛直ボーリングで明らかにされたことから、これにより地山の状況を推定した結果、トンネルレベルでは速度逆転がみられる箇所において劣化した硬質泥岩および劣化した安山岩を通過し、S波速度の変化する位置が互いに異なる地質不連続面が4ヶ所あると推定した。また、電気探査では小坪川直下、東京起点640km000m付近で断層または貫入境界と判断した不連続面が、表面波探査ではそれに近い位置にF2として認識されており、この付近で何らかの地質境界がある可能性が高まった。

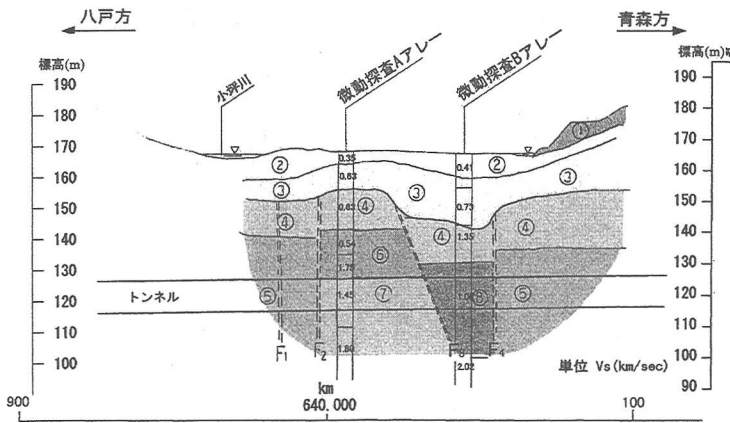


図-7 S波速度構造断面図

	S波速度(km/s)	S波速度(km/s)
①未固結堆積物	~0.60	②河床礫 ~0.60
③安山岩	0.60~1.30	④安山岩 1.28~1.43
⑤安山岩	1.62~1.89	⑥硬質泥岩 1.75~1.95
⑦硬質泥岩	1.45	⑧安山岩 1.06~1.22

東京起点639km927.5m地点から左側方向へ126m、また640km010m地点から右側方向へ89m実施した。

その柱状図（平面図）を図-8に示す。ボーリングコアを見ると、東京起点639km955m付近に安山岩と泥岩の境界があり、その先の泥岩は安山岩貫入の影響を受けて十数mの区間で劣化していた。また、639km985mから

14B-1(640km007m) 14B-2(640km078.5m)

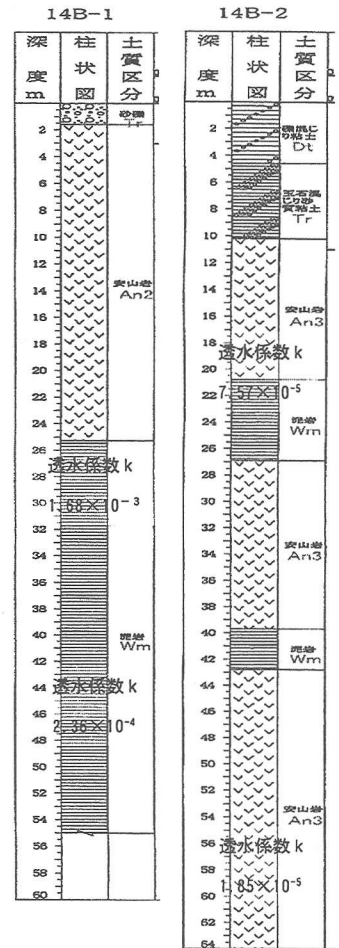


図-8 地質柱状図

An3: 貫入安山岩
透水性係数単位:cm/s

(4) 先進ボーリング

掘削直前の段階においては、トンネル掘削レベルでの連続的な地質の変化の様子を把握するため、水抜きを兼ねて先進ボーリングを行った。

小坪川直下に係る先進ボーリングは

は泥岩が破碎されており、これは断層破碎帯であると見られる。640km000m以降では劣化した泥岩および変質化した安山岩が交互に現れたが、左右で出現する位置が異なる結果となった。640km080m付近ではコアが流失したため、この位置に断層があると判断した。これは電気探査における推定断層位置とほぼ一致していた。なお、孔内からの湧水は平均80L/min程度と少量であり、その水質は鉛直ボーリングと同様、河川水とは異なっていた。

4. 地質状況の判断と施工方法の検討

以上の結果から総合的に判断した地質状況は以下のとおりである(図-9の地質平面図参照)。

①先進ボーリング結果およびリニアメントの方向から東京起点 639km955m 付近に安山岩と泥岩の境界があり、安山岩貫入の影響によって泥岩が十数mにわたり劣化している。

②639km985m 付近から断層破碎帯とみられる不連続面があり、約20mにわたり劣化している。また、電気探査の比抵抗値変化率が639km955mにおける安山岩と泥岩の境界よりも大きくなることから、この断層と線路方向のなす角度は639km955mの境界ほど鋭角ではないと考えた。鉛直ボーリング14B-1によれば天端部の泥岩が高い透水性を示していることから、この区間を施工する際は特に多量の湧水を考慮しなければならない。またボーリングからの湧水は河川水とは水質が異なるため直接河川水を導水する可能性は低いと考えられるが、地下水の動水勾配の変化にも注意すべきであると判断した。

③断層を過ぎた後の約80m区間(640km005m付近から640km085m付近まで)は先進ボーリングから安山岩および泥岩がランダムに分布していることが明らかになり、電気探査において全体的に低い比抵抗値を示すことから、劣化範囲が広範囲にわたると考えた。さらに、表面波探査・微動探査の結果からも岩石が変質・劣化の可能性が示唆された。このことから地質状況が小刻みに変化する可能性があるため、掘削には注意を要する。天端部の安山岩は難透水性であることが示されているが、掘削部は劣化帯であることから予期せぬ水脈が存在する可能性もあり、やはり慎重な施工が求められる。

④640km085m付近にある断層を過ぎた後は硬い安山岩が分布しており、以後の掘削は順調に進むと考えた。また比抵抗値が急速に高い値へと変化することから、断層は線路方向に対し鋭角ではないと推定される。

これらの判断から、小坪川直下の施工方法を検討した。当該区間の地山等級評価は、ボーリングと同時にを行ったPS検層試験から求められたP波速度構造からは $I_L \sim I_N$ 、表面波・微動探査から求められたS波速度構造からは $I_S \sim I_N$ で、多少の差異はあるもののいずれも非常に脆弱な地質であると評価された。また、断層などの不連続面がある付近においては変質帯や劣化帯の存在および突発湧水の可能性があるため、施工

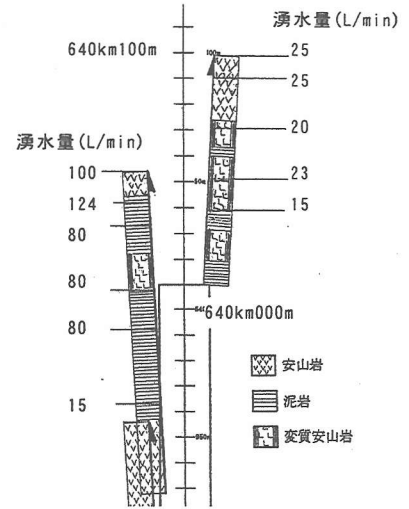


図-8 先進ボーリング柱状図

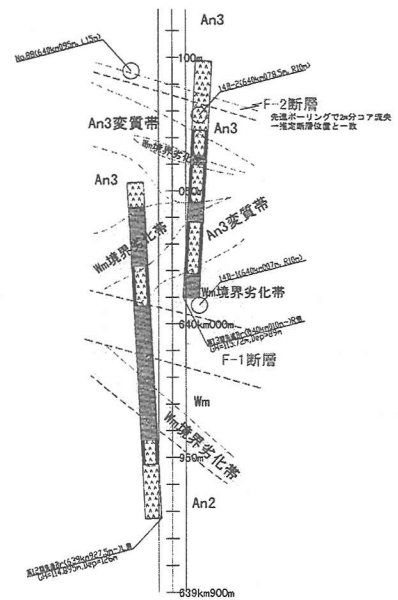


図-9 地質平面図

記号は図-5, 6, 8を参照。

には十分な注意を要すると考えた。特に、640km005m 付近からは急激に比抵抗値が小さくなることから、この区間が小坪川の低土被り部において最も慎重に施工すべき箇所であると考えた。

これらの考察から、掘削は制限発破および支保パターンの変更で対応することとし、最も慎重な施工が必要と判断された区間においては切羽の状況に応じて水抜きボーリング、先受工および鏡止工などの補助工法を用いて施工を行うこととした。なお、河川水の水質とボーリングの水質から、直接河川水を導水する可能性はないと考えられたため、止水目的の薬液注入工法を行う必要性はないと考えた。

5. 実際の掘削状況との対比

検討した施工方法をもとに掘削を進めていった結果、泥岩層が分布している部分（東京起点 639km972m 付近）で鏡面が自立できない状態になった。この部分は事前調査の予測では安山岩の貫入（前章4の①参照）や断層による破碎帯（同②参照）からは外れていたところであるが、実際には非常に脆弱な地質が連続していることが判明した。このため、シリカレジンによるAGFなどの先受工を行うことになったが、事前に岩質を把握していたことにより、素早い判断で適切な工法、注入ピッチおよび薬剤を選定することができたと考えている。

これ以外の点に関しては事前調査から予想した地質状況が大きく外れることはなく、調査の有効性が確認された。たとえば、切羽から多少の湧水はあったが、施工前に最も懸念されていた河川水の導水は起こることはなかった。また、最も慎重な施工が必要とされた区間は推定したとおりの脆弱な地質が続いた。なお、最後の安山岩変質帯を過ぎた 640km078m 付近から切羽は予想どおり安定に向かい、施工が最も困難とみられた箇所の掘削は終了した。

6. おわりに

今回は地質条件の悪い区間を通過することが予想されていたため、複数の手法を用いて入念に事前調査を行ってからの施工となった。電気探査は比抵抗値の異なる安山岩と泥岩を判別し、地質の不連続面の位置を調べるのに有効であった。鉛直ボーリングでは電気探査を補完し、正確な岩種を把握するとともに、孔内試験と岩石試験によって河川水導水の可能性を検討した。さらに表面波探査・微動探査によって地下のS波速度構造を求めることにより地下深部の様子を空間的に把握し、同時に地山の状況を推定することができた。最後に行った先進ボーリングではトンネルレベルにおける地質の連続的な変化を明らかにし、孔内の湧水状況は河川水導水の可能性を最終的に判断する指針となり得た。以上から、物理探査とボーリングを適切に組み合わせることによって地下構造を効率的に把握し、施工に際し有用な情報を手に入れることが可能であることが示された。その一方で予想以上に切羽が不安定だった場所があるなど、複数の調査法を併用しても地下深部の様子を完全につかみきれないわけではないことも同時に示されたが、その際においても岩石の物性等が事前に把握できていたため、事故に至る前に適切な補助工法を選定することが可能であった。

以上のように、当該区間において無事故かつ順調に掘削を進められたのは事前調査の成果によるところが大きい。このことは、施工も含めたトータル的なコストダウンにもつながっていると考えられる。安全な施工を行う上で事前の地質調査は欠かせないものであるが、今回のように既往調査から得られている情報と、それから予測される地質状況および調査にかかる経済的・時間的な条件も加味して適切な調査法を選択し、組み合わせて行うことが重要であると考えられる。

参考文献

1)例えば 地盤工学会:地盤工学への物理探査技術の適用とその事例,p445,2001