

# 複雑に地山性状が変化するトンネル掘削についての施工報告

## Report of tunnel excavation under complex geological conditions

山口 紗奈\*      内田 裕二\*  
Sana Yamaguchi      Yuji Uchida  
諏訪 至\*\*      池田 義迪\*  
Itaru Suwa      Yoshimichi Ikeda

### 要 約

本トンネル工事において、当初設計では、比較的安定した玄武岩を対象としてトンネル掘削を実施することが想定されていた。しかし、トンネル掘削を約 80 m 進めた位置において、切羽掘削中に左肩より崩落が発生した。切羽崩落の発生は、左脚部および天端部に玄武岩岩塊を含む強風化堆積物が堆積していたことが要因であった。そのため、以降のトンネル掘削を安全に施工するためには、切羽前方の地山強度の分布を把握することが重要であると考え、DRISS-3D、電磁波探査を活用して、切羽前方を確認しながらトンネル掘削を実施している。本論文では、その施工実績を報告する。

### 目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 切羽崩落発生までの経緯
- § 3. 切羽崩落発生の原因
- § 4. 切羽前方地山の性状把握に関する取り組み
- § 5. まとめ

### § 1. はじめに

「長崎 497 号松浦 1 号トンネル新設工事」は、長崎北西部に位置する福岡と佐世保をつなぐ西九州自動車道の一部区間であり、全長 1204 m、掘削断面 109.3 m<sup>2</sup> (C II) の高規格道路のトンネル工事である。

トンネル掘削は、終点側（松浦市志佐町白浜免地先）から起点側（松浦市志佐町庄野免地先）へ下り勾配にて行っている。掘削する地山の主な地質は、終点側が新生代新第三期中期～前期の泥岩・玄武岩、起点側が新生代新第三期中期～前期の砂岩・泥岩で構成されている。玄武岩と砂岩の地層境付近を掘削する際（支保工 No.81, TD81.3 m）に左肩より崩落が発生した（写真一1）。

本稿では、この切羽崩落の発生原因の究明および以降のトンネル掘削における切羽前方地山の性状把握に関する取り組みについて報告する。

### 【工事概要】

工事件名：長崎 497 号松浦 1 号トンネル新設工事  
発注者：国土交通省 九州地方整備局

\* 九州（支）松浦 1 号トンネル（出）

\*\* 土木設計部二課

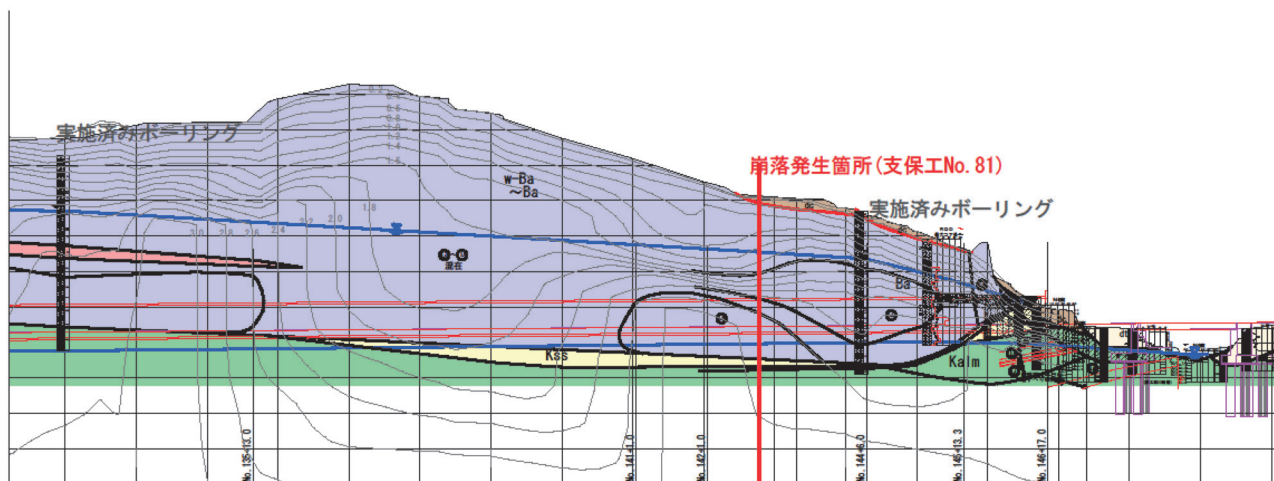
請負者名：西松・谷川特定建設工事共同企業体  
工事場所：長崎県松浦市志佐町庄野免地先～白浜免地先  
工事内容：トンネル掘削（機械・発破）・覆工 1204 m 他



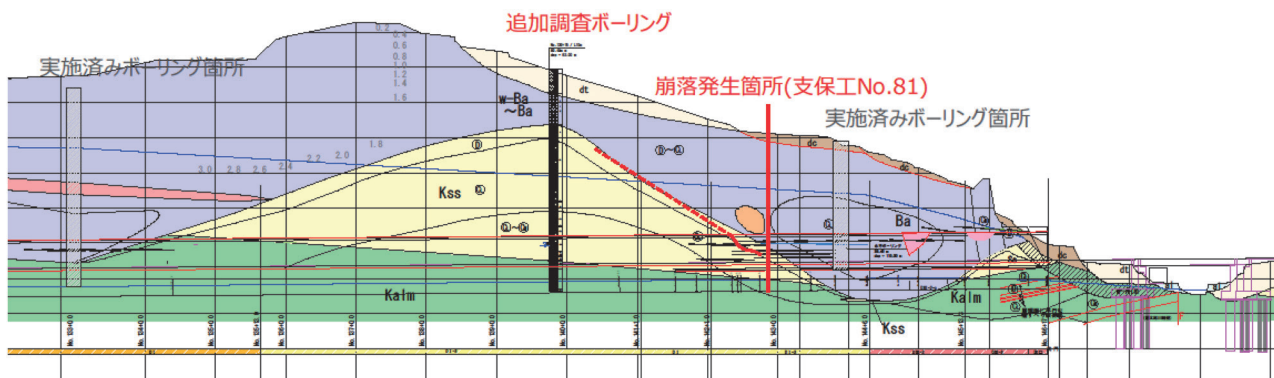
写真一1 崩落発生時の切羽写真（支保工 No.81）

### § 2. 切羽崩落発生までの経緯

支保工 No.81 (TD81.3 m) において大崩落が発生する直前の施工状況および切羽の様子について表一1 に示す。切羽は自立性が低く、小口径長尺鋼管鏡補強工および長尺鋼管先受け工、一次インバートによる早期閉合を施工しながら掘削を進めていた。そのような状況において、支保工 No.79 の鏡吹付終了後、左肩より小規模な抜け落ちが発生した。抜け落ちを最小限に抑制するために、対策として、AGF 鋼管の間を縫うように注式式フォアポーリングによる先受けを実施した。また、左側脚部の沈下が卓越しており、早期閉合までの変位を抑制するため、支



図一 地質縦断面図 (当初設計)



図二 地質縦断面図 (追加ボーリングに基づく見直し後)

保工連結とサイドパイルにより脚部補強を実施した。変位をより抑制するため、支保工 No.80 以降は支保工設置間隔を 800 mm に変更し、支保工 1 基にかかる荷重を低減させた。切羽鏡面は、自立性が低下しており不安定であったため、半断面ずつの掘削など慎重に施工を実施していたが、支保工 No.81 において左肩より大崩落が発生した。推定流出土量は 100 m<sup>3</sup> であった。

崩落発生箇所の地質縦断面図を図一1, 2 に示す。

### §3. 切羽崩落発生の原因

切羽崩落発生原因は、下記 2 点あると考える。

- ①左脚部の沈下による周辺地山のゆるみの拡大
- ②想定よりも脆弱な玄武岩の出現

#### 3-1 左脚部の沈下による周辺地山のゆるみの拡大

図一3 に、特に変位が顕著に表れた大崩落箇所手前での A 計測 (坑内計測) の結果を示す。切羽掘削に伴い 20 mm/日の変位が確認されたため、掘削を停止し、沈下対策 (支保工連結) を実施した。しかし、掘削停止時においても 14.2 mm/日の沈下が発生した。さらなる沈下対策として、支保工連結 2 段・サイドパイル 1 段の施工を実施すると、掘削停止時の変位は 1.8 mm/日まで収まった。しかし、掘削を再開すると 12.0 mm/日の沈下が発生

表一 崩落発生までの時系列

日時	切羽位置	記事
2021 1/27 11:50	支保工 No.79	上半掘削完了→鏡吹付実施後左肩崩落→鏡吹付再施工
21:00		崩壊防止のため左肩部の注入式 FP 実施
2021 1/28 1:30		注入式 FP 注入完了後、左肩再崩落→鏡吹き・吹付吹き直し
7:00		支保工沈下対策脚部連結 (支保工 No.60~No.78)
19:00		サイドパイル (1 段目) (支保工 No.68~78)
2021 1/29 7:00	支保工 No.80	上半右部掘削 (支保間隔 800)
19:00		掘削に伴う沈下対策として、サイドパイル (2 段目) 追加施工 (支保工 No.68~No.78)
2021 1/30・1/31		現場閉所
2021 2/1 10:00	支保工 No.81	半断面ずつ掘削を実施
13:40		支保工建て込み前に左肩部大崩落 (推定流出土量 100 m <sup>3</sup> )

したため、サイドパイルを一段増設するなど、早期閉合までの沈下を抑制する必要があった。

左側脚部の地山が非常に脆弱であり、左脚部の沈下が卓越したことで、トンネル周辺地山にゆるみが生じたことが、切羽崩壊を招いた原因の一つであると考えられる。



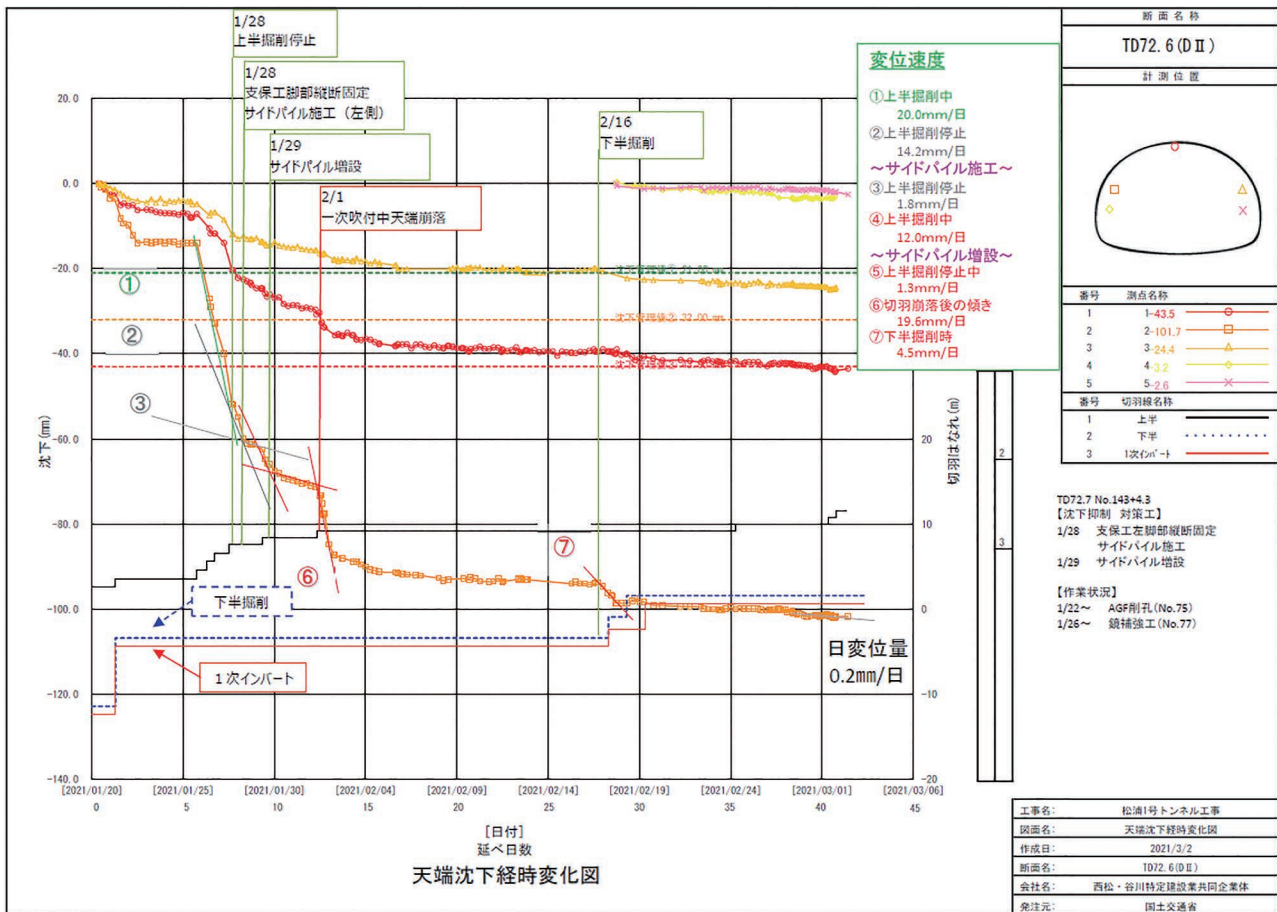


図-3 A計測結果(支保工No.72)

3-2 想定よりも脆弱な玄武岩の出現

当初設計では、強度の大きい玄武岩が存在し、硬質な地質であると想定されていた。しかし、切羽崩落により流出土を確認したところ、風化岩および玉石状の玄武岩であった。天端周辺の地山が強風化しており、その中に硬質な玉石状の玄武岩が堆積していたことが、切羽崩落の原因の一つであると考えられる。

§4. 切羽前方地山の性状把握に関する取り組み

前述した切羽崩落の発生後、以降のトンネル掘削において、同様の事象発生を防止するため、切羽前方の地山性状を把握する①DRISS-3D、②電磁波探査、③追加調査ボーリングを実施した。これらのデータを活用し、視覚的に地山の性状を確認することは、支保パターンの決定、補助工法の要否の判断に有効であった。

4-1 DRISS-3D

DRISS-3Dは穿孔データを3D表示し、空間補間技術を活用することで掘削断面内外の地山強度の分布を算出・図化することができる。本工事では、水平コアボーリング(左)・前方探査(30m毎に天端・右の2箇所)・補助工法施工時(AGF・鏡ボルト)の穿孔データを用いて解析を実施し、DRISS-3Dへ反映させている。3D表示され

た情報は、数値データの羅列と異なり視覚的に捉えやすく、有効な判断材料となる。

図-4に、崩落箇所付近のDRISS-3Dの解析結果を示す。(a)はAGFや鏡ボルト、前方探査等によって得られた穿孔データに基づき地山換算強度を算出しており、(b)はトンネル壁面の地山換算強度を示している。この結果により、崩落箇所前後の天端付近には地山換算強度10MPa程度の軟弱な地山が分布していることがわかる。天端付近に分布している岩盤強度の高い硬質な地山は、崩落した土砂に含まれる堅硬な玉石状の玄武岩岩塊の強度を捉えたものと推察される。

図-5に、崩落した測点の地山換算強度の分布を示した断面図、図-6に、崩落前の切羽写真を示す。両者を比較すると凝灰岩が観察される箇所では地山換算強度が小さく、切羽崩落が生じた風化砂岩や玄武岩が観察される場所では、凝灰岩より強度が大きいことが分かる。このことから、本トンネルでは、地山前方探査によって、岩塊強度が大きいと予想された場合でも、玉石状の岩塊を含む崩積土層のような自立性の乏しい地層が存在している場合があり、その層を特定することは非常に難しい。穿孔データはあくまでも削孔した部分の推定岩盤強度を空間的に可視化したものであるため穿孔データのみで前方地山を評価するのではなく、他の情報も踏まえた総合的な判断が必要である。

4-2. 空中電磁波探査

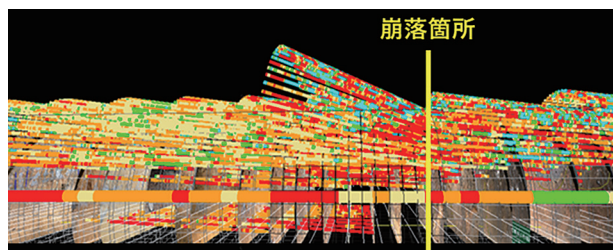
本工事では、空中電磁波探査を実施している。電磁波探査によって比抵抗値が得られるが、これを切羽前方の地山性状把握に最大限活用することを考え、比抵抗値の変化量に着目して解析を行った。「比抵抗値と地下水・地質状況の関係」を図一7に示す。一般的に、比抵抗値が低いと体積含水率が高く、粘土鉱物が多い地質（断層破碎帯・粘土化されている地質）、比抵抗値が高いと体積含水率が低く、粘土鉱物が少ない（新鮮で堅硬な岩盤）。つまり、比抵抗値の変化が大きな箇所では、水の分布状況に差があることから、亀裂の増加や、地質が変化する場所を特定できる。比抵抗値の変化量に着目し地山検討を行うため、今回は鉛直1次微分フィルタ（地層境界抽出）とLoGフィルタ（地山不良箇所フィルタ）を用いて、比抵抗の相対的な高/低の可視化を行った。

図一8の上図は工事開始後に実施した比抵抗値の縦断面図、下の図は比抵抗値の変化量を現した縦断面図である。比抵抗値変化は、下から上に向かって大きさを評価しており、青色が減少傾向の変化、赤色が増加傾向の変化を示す。また、色が濃い程変化量が大きい。今回発生した崩落箇所付近の比抵抗値変化は濃い赤色を示しており、比抵抗値増加傾向の変化が大きいことが分かる。また、今回以前に小崩落が発生した箇所でも、濃い青色（比抵抗値減少傾向の変化が大きい）および濃い赤色が入り乱れている。以上のことから、比抵抗値変化が減少傾向でも増加傾向でも、変化が大きい箇所において小崩落や今回の崩落が発生しており、地山性状の急変や不良地山となる可能性がある。

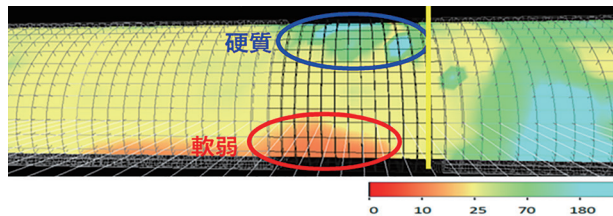
よって以降の施工では、DRISS-3Dで得られた情報に加えて、比抵抗値変化の大きな箇所を捉えることで硬質な岩塊を含む自立性の低い場所を特定した。

4-3 追加調査ボーリング

今回崩落が発生した箇所は、2つの鉛直調査ボーリングの中間であり、2箇所のボーリング間隔は200m以上あり、途中の地質構造が把握されていなかった。切羽には地層境が現れており、当初の地質縦断面図とは大幅に異なる地質が切羽で確認されているため、現在切羽で観察されている砂岩層がどのように堆積しているのか把握するため、追加で調査ボーリングを実施した。図一1に示すのは当初地質縦断面図、図一2に示すのは追加調査ボーリングを実施後に更新した地質縦断面図である。更新した地質縦断面図（図一2）は当初想定した地質縦断面図（図一1）とは大きく異なっており、現在切羽に観察される砂岩は大きく上へと盛り上がっており、想像以上に堆積岩が厚いことが分かった。しかし、その先の既存のボーリングでは堆積岩を確認していないことから図一2に示すように、トンネル前方約150mほど（支保工No.259、測点No.134+0.0付近）の位置において再び玄武岩と砂岩・泥岩の地層境になると推測される。

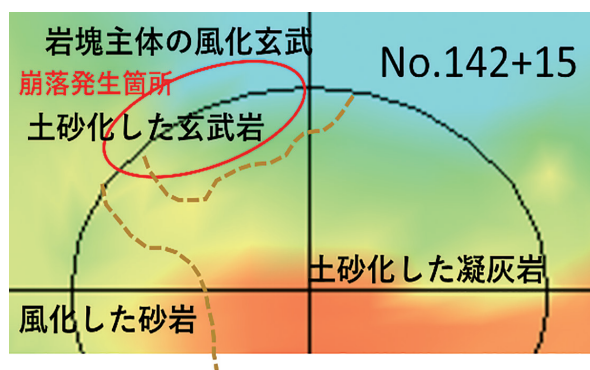


(a) 穿孔箇所の地山換算強度

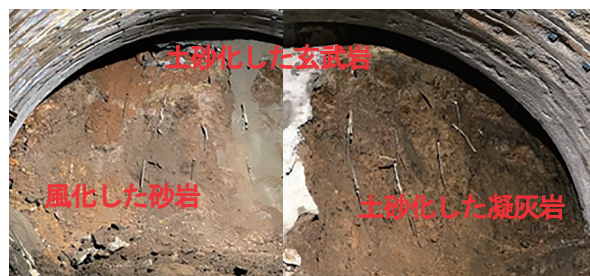


(b) トンネル壁面の地山換算強度

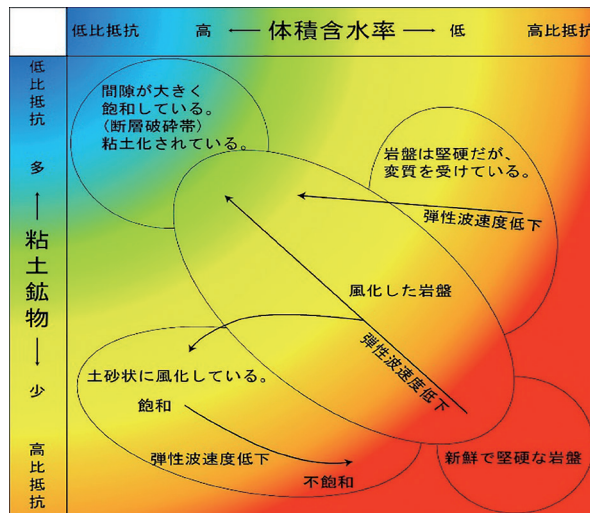
図一4 崩落箇所付近 DRISS-3D データ



図一5 崩落切羽地山換算強度分布図



図一6 崩落切羽写真



図一7 比抵抗値と地下水・地質状況の関係



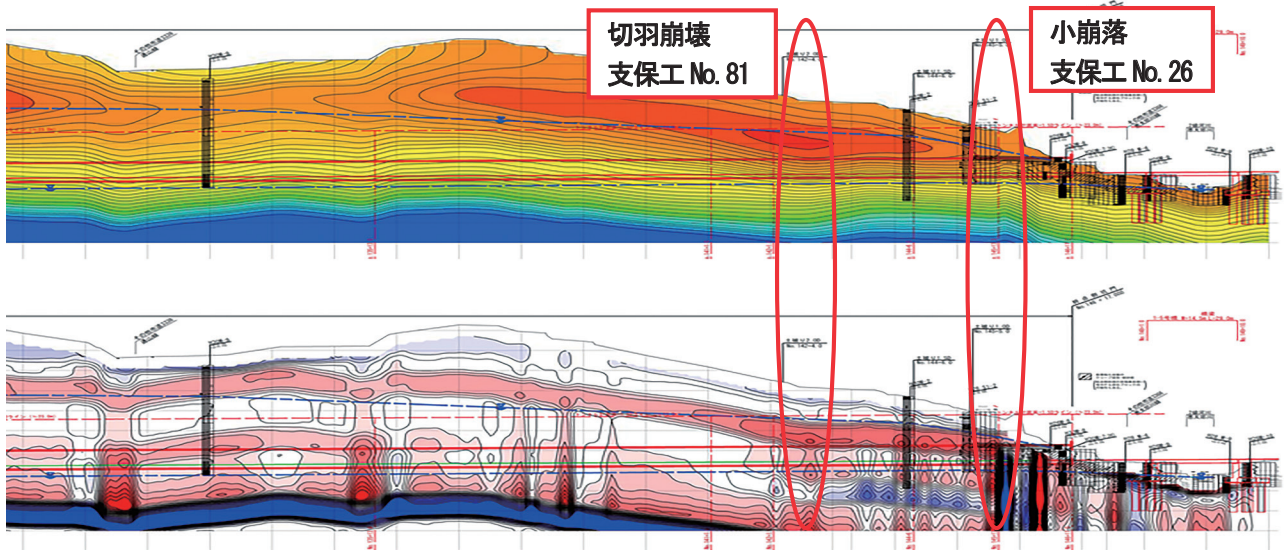


図-8 空中電磁波探査による比抵抗値  
(上図：比抵抗値，下図：比抵抗値の変化量)

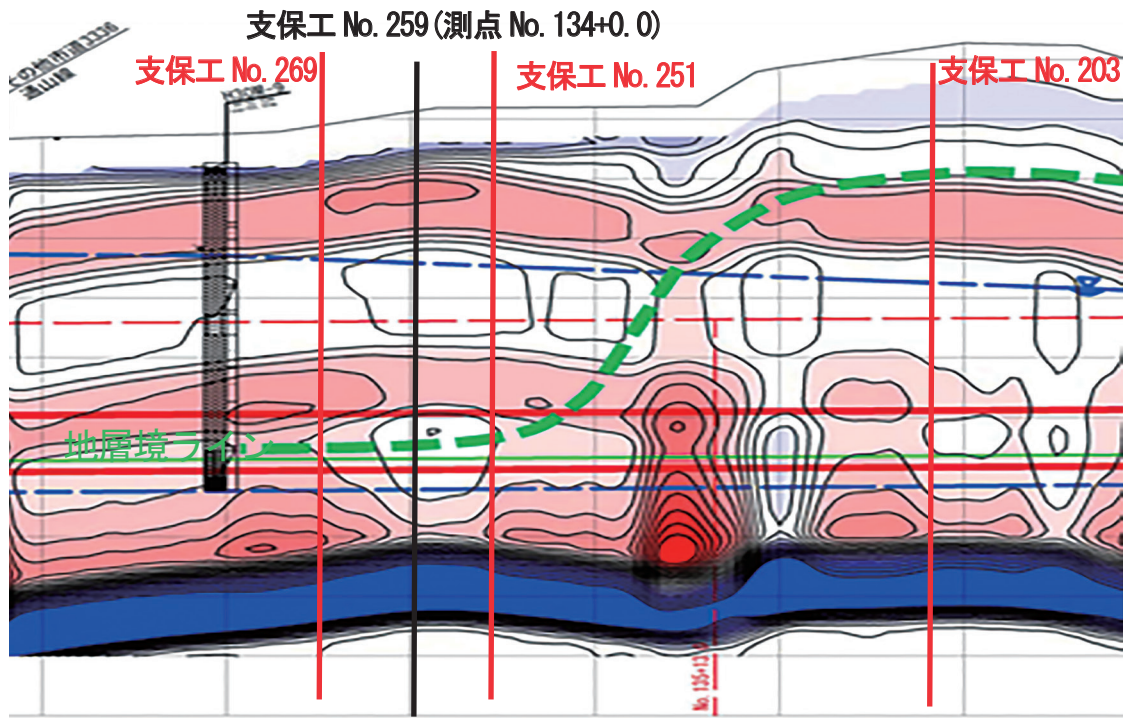
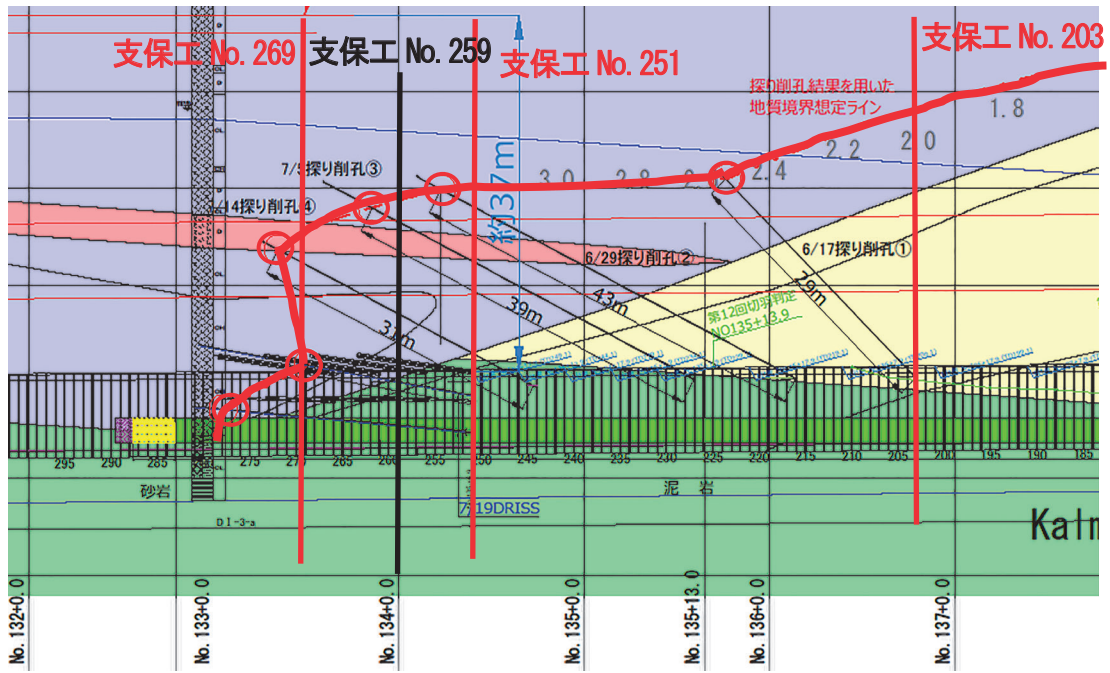


図-9 比抵抗変化量分布図

4-4 得られた成果

4-3より、前方切羽に今回崩落が発生した地質境と同じ地質の地質境が支保工 No.259 (測点 No.134) 付近にあることが予測された。今回のような切羽の崩落を発生させないため、対策工をあらかじめ実施していく必要があった。対策工を実施する箇所を特定するためにも、地層境を正確に把握する必要がある。DRISS-3D (4-1) や比抵抗値変化 (4-2) の結果を照らし合わせ確認を行った。電磁波探査より推定される地層境ライン (図-9) に向かい、さぐり削孔を計4回実施した。その穿孔データの解析を行い、図-10に示す地質境のラインを推定し

た。当初想定していた地層境ライン (図-9) よりも急激に地層境が下がっていることが推測され、この先、支保工 No.269 において天端部が玄武岩と砂岩の地質境となり、その後急激に玄武岩へ変化することが想定された。本トンネルにおいて地質境の玄武岩は、前節3で述べた観点からも十分に注意する必要がある。よって、推定地質境までの土被りが約0.5Dとなる、支保工 No.251 より長尺鋼管先受け工および小口径長尺鋼管鏡補強工の補助工法の実施を開始し、切羽の施工を進めた。実際に支保工 No.267にて玄武岩が右肩に出現し (図-10)、切羽に占める割合が徐々に増加したが、切羽の崩落等は発生せ



図一10 推定される地質境界と周辺の実際の切羽写真

ず、安全に施工を行うことができた。

当該トンネルのように複雑に地山性状が変化して、脆弱な風化岩に強度の大きな玉石が混在するような地山では、正確な切羽前方地山の性状、地質境をとらえるのは非常に難しい。4-1と4-2で説明した複数の方法を活用することによって、総合的に判断し、より正確に把握することが、切羽の掘削を安全に進めていくために重要である。

### §5. まとめ

本工事では、左脚部および天端部に玄武岩岩塊を含む強風化堆積物の堆積があり、左脚部の急激な沈下が進んだことで、天端の自立性のない強風化堆積物にゆるみが生じ、AGF鋼管にかかる荷重が増加して鋼管が破断し、切羽の崩落が発生した。本トンネルでは、強度が大きい

岩盤の分布が推定される場合においても、脆弱地山に硬質な玉石状の岩が堆積している可能性があり、軟弱な地質と硬質な地質境では十分に注意する必要がある。

また、切羽前方地山の性状の把握方法として、DRISS-3Dと空中電磁波探査を実施したが、複数の調査結果を総合的に活用して地山特性の把握をすることが非常に有効である。実際に、崩落後に通過した玄武岩と砂岩の地質境(測点No.259付近)では先受けや鏡補強を事前に実施して切羽の施工を進めた。結果としては分布していた玄武岩が玉石状の堆積物ではなく硬質な柱状節理であったが、崩落等が発生することなく安全に施工を行うことができた。

今後も前方探査を行い地質の変化をより正確に確認しながら掘削を進めていき、不良地山と推定される箇所においては、先行して先受けや鏡補強等の対策を実施しながら安全に進めていく所存である。