

空中電磁探査法を用いた花崗岩類熱水変質帯の トンネル地山評価

杉本利英¹・河戸克志²・酒井英男³

¹正会員 国土交通省利賀ダム工事事務所 (〒939-1363 富山県砺波市太郎丸1-5-10)
E-mail:sugimoto-t8442@hrr.mlit.go.jp

²大日本コンサルタント株式会社 防災事業部 (〒340-0851 埼玉県越谷市七左町5-1)

³富山大学大学院理工学研究部 (〒930-8555富山県富山市五福3190)

トンネルを合理的かつ経済的に掘削するためには、事前調査の段階で的確に地山の状態を把握することが重要である。しかし、事前調査で、熱水変質による不良地山の確認とその評価を行うのは困難である。本研究では、既往の地表地質踏査、弾性波探査およびボーリング等の事前調査に加えて、近接トンネルの地山情報も併用する空中電磁探査法を実施した。同探査では、とくにグリッドレベリングや比抵抗差分解析などで探査精度を上げ、変質や湧水に起因する地山変換点をとらえるための比抵抗コントラスト解析を行い、掘削実績との比較検証を行った。その結果、空中電磁探査法の高精度比抵抗解析は、トンネル地山状態を高精度で確認できることを明らかにした。

Key Words : *helicopter-borne electromagnetic method, hydrothermal alteration, granite, rock mass evaluation, tunnel*

1. はじめに

財政事情が厳しい中、我が国における社会資本整備は、経済的・効率的に行っていく必要がある。

図-1に示す富山県西部を流れる一級河川庄川の右支川利賀川で平成5年から建設している利賀ダム建設事業は、工事用道路(L=9.3km)の建設費が全体事業費の約3割を占めている。また、当該工事用道路は、トンネル区間が66%を占めており、トンネルのコスト縮減がダム事業全体のコスト縮減と早期完成につながる重要な課題である。

この課題に対応する一つの方策として、トンネルの計画地点にて実施する事前地質調査で地山状況を正確に把握することがあり、これにより、破碎帯などの弱部への対策や支保工や補助工法を適切に行うことができ、コスト縮減や工期の短縮が可能となる。それには、トンネル計画地点の地山状況の正確な把握が重要であるが、従来の地表地質踏査、弾性波探査およびボーリング調査等は、これまで多くの指摘¹⁾があるように精度的限界がある。とくに熱水変質による不良地山の確認とその評価は、地表からの調査や限られたボーリング調査では困難な場合が多い。

今回、既往のトンネル事前調査に加えて、施工済みの近接トンネルの地山情報を併用した空中電磁探査法の高

精度比抵抗解析を行った結果、熱水変質作用を受けた花崗岩類が分布する山岳地帯のトンネル地山状態を高精度で確認できることが明らかになったので報告する。

2. ダム工事用道路の概要

利賀ダムは、ダム高 112m、堤頂長 232m、総貯水容量 31,100,000m³の重力式コンクリートダムで、現在ダム工事用道路を建設中である。図-2 にダム工事用道路およびトンネル位置を示す。

工事用道路は、富山県南砺市利賀村栃原地先を起点として、利賀村利賀地先までの延長 9.3kmの道路で、ダム建設時に資材運搬道路として利用し、ダム完成後は一般国道 471 号のバイパス道路となる計画である。

工事用道路の約7割を占める利賀トンネルは、全延長 L=6.12kmの内、利賀トンネル 3 工区 L=1.14kmを終点側から着手し、3 工区完成後、利賀トンネル 1 工区 L=2.17km、2 工区 L=2.81kmを両トンネル坑口から掘削する予定である。利賀トンネル 3 工区に着手する現時点では将来市道となる押谷トンネル L=0.94kmが、平成 17 年度に施工済である。図-3 に利賀トンネル標準断面図(CⅡ)を示す。

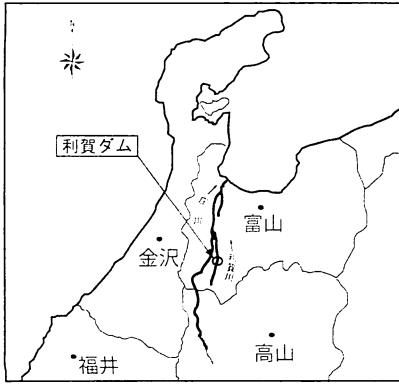


図-1 調査位置図

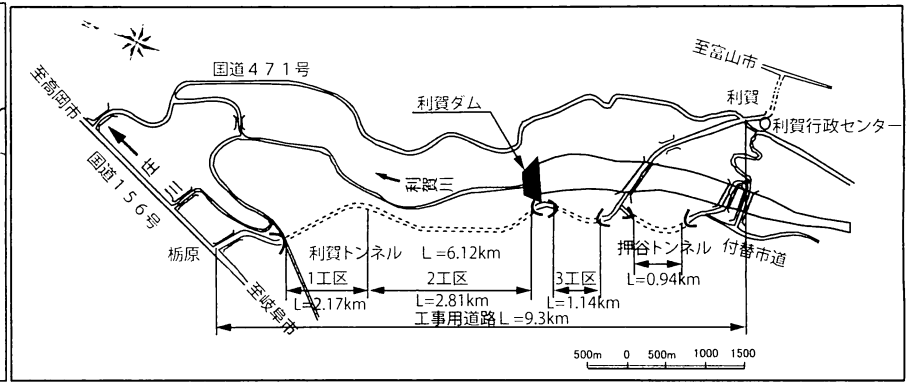


図-2 ダム工事用道路およびトンネル位置図

3. 調査地の地形・地質

ダム計画地域は、富山県南西部の花崗岩類から構成される山岳地帯に位置する。調査地周辺の山腹斜面は、V字谷をなし北流する河川に浸食され 40～60°と急峻である。山腹斜面を流下する支沢には、比高 10～30m 程度の滝が多く形成されており、年間を通じて流水が認められる。

地質は、中生代ジュラ紀に侵入した花崗閃緑岩（一部カタクレサイト質）からなり、花崗閃緑岩は、所々で新第三紀中新世のヒン岩に貫入され、接触変成作用を被っている。この他、山麓の緩斜面や支沢には崖錐性堆積物が分布し、河川沿いの所々に形成されている小規模な平坦～緩斜面には、未固結堆積物が分布している。

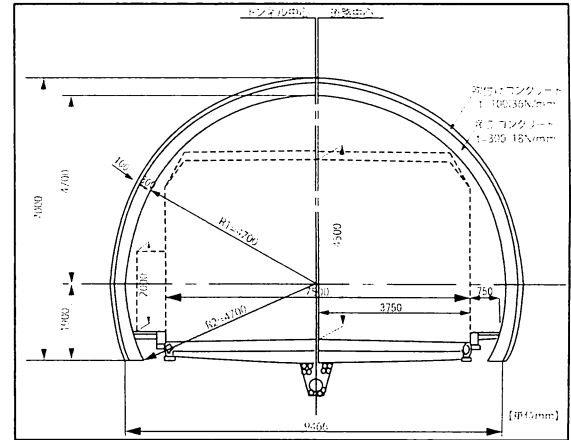


図-3 利賀トンネル標準断面図（支保CⅡ）

4. 調査の経緯

ダムサイト周辺や貯水池周辺斜面、工事用道路トンネル、原石山など広域的な地質状況を把握する目的で、平成7年度にダム計画地域約 22km²の範囲に対し空中電磁探査を実施した。探査は、トンネルルート直上および探査範囲に 100m 間隔の東西方向の測線を設け、対地高度 30m にて 5 周波数同時に測定した。測線延長は 186.6km に達する。

空中電磁探査法は地下の電気比抵抗を測定する電磁探査法の一つである。図-4 に示すようにヘリコプターを用いて空中から人工的に交流磁場を発生させ、それにより地中に電磁場が誘導される電磁誘導現象を利用し、地盤の広範囲の 3 次元的比抵抗を求める。迅速で均一な精度で測定でき、地質や地下水状態を把握できる有効な調査法である²⁾。

この空中電磁探査は、トンネル事前調査段階で実施しており、解析時点ではボーリング等の事前調査は無く、比抵抗値から弾性波速度値を求める換算弾性波速度解析³⁾結果に基づき押谷トンネルの設計を行っている。

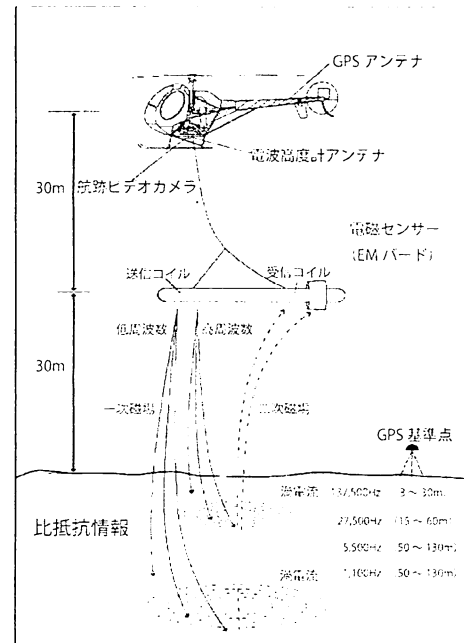


図-4 空中電磁探査法概念図

押谷トンネルの掘削は、平成 15 年度に終点側から着手したが、換算弾性波速度解析結果から C I パターンが想定された区間に入ってもトンネル切羽状態は不良であった。そのため、施工中に水平ボーリングと起点側未施工区間で弾性波探査を追加した。しかし、実際の施工で

確認したトンネルの地山は、亀裂が著しく発達し、部分的に生じた湧水に加えてシームが挟在しており、掘削中は小崩落が多発した。トンネル支保パターンは追加調査でB等級とした箇所は最大でCⅡ等級、部分的にDⅠ等級で施工を終えている。この結果を踏まえて、同様の地質条件が想定された利賀トンネル3工区では、着手前に、事前調査に加えて新たに空中電磁探査法の比抵抗解析による地山の再評価を行うことにした。

5. 新たな空中電磁探査法の調査と従来施工の対比

近年、空中電磁探査法を用いた比抵抗探査解析は、比抵抗値の解析精度の向上と共に微細な比抵抗構造に着目した解析表示技術が可能となり、加えて、トンネル施工実績やボーリング調査結果を反映する事で精度の高い地山評価が可能となってきている⁴⁾。そこで、利賀トンネル3工区の着手に先立ち、施工を完了していた押谷トンネルにおいて、過年度実施による比抵抗探査データを利用して、結果の精度向上および変質・湧水等に起因する地山変化区間特定の2点に着目する比抵抗再解析を実施し、施工実績と比較検証を行った。

解析では、測線間の平面分解能を最近開発されたグリッドレベリングによって5mグリッド毎に補正し、さらに、比抵抗差分解析により深部比抵抗値の精度向上を図った。

また、土砂－岩盤境界、岩盤ゆるみ領域、断層、破碎帯および地下水位等の地盤物性の変化点の解明のため、比抵抗値の変化率に着目した解析により比抵抗コントラストを求めた。

(1) トンネル地山評価方法

空中電磁探査法の新手法によるトンネル地山評価は、換算弾性波速度解析で検討した地山等級に対して、比抵抗コントラスト解析で表示された区間をさらに1ランク低減する手法⁵⁾を用いた。

i) 換算弾性波速度に基づく地山等級区分

解析精度を上げた比抵抗値を用いて、事前調査と施工記録に基づいて、飽和と不飽和条件および初期入力値を設定して、換算弾性波速度を算出した。地山等級区分は、道路トンネル技術基準（日本道路協会）⁶⁾を参考に、トンネル計画高+1.5Dの範囲に出現する換算弾性波速度構造と押谷トンネルでの施工実績との対比から下記の様にした。

- ・CⅠ：3.75km/sec～
- ・CⅡ：3.25～3.75km/sec
- ・DⅠ：2.50～3.25km/sec

表-1 押谷トンネル工事概要

項目	工事内容
延長	L=940m
断面	掘削断面積A=55.8㎡（CⅡ），56.3㎡（DⅠ）
施工法	NATM工法
掘削方式	発破工法
掘削工法	CⅡ（補助ベンチ付全断面掘削工法） DⅠ，DⅢ（上半先進ベンチカット掘削工法）
補助工法	フォアボーリング、長尺フォアパイリング 鏡ボルト、鏡吹付け、水抜きボーリング

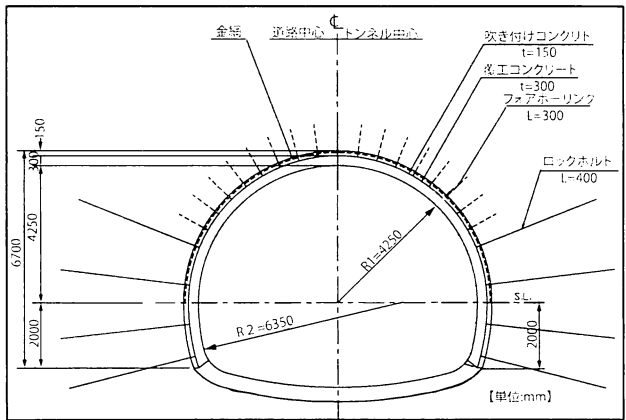


図-5 押谷トンネル支保パターン（DⅠ）

・DⅡ：2.50km/sec 以下

ii) 比抵抗コントラストによる地山等級区分の低減

比抵抗値の物性境界となる地山変化点を抵抗異常区間としてコントラストで表示し、当該区間を換算弾性波速度による地山等級区分より1ランク下げて評価を行った。

(2) 押谷トンネルの概要

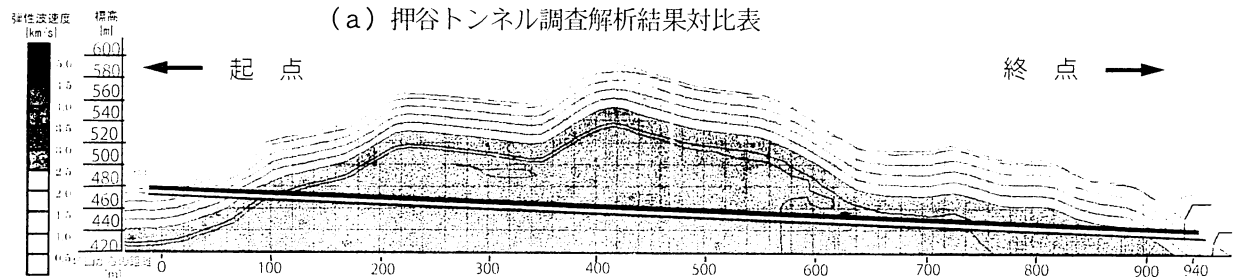
押谷トンネルは、延長940m、最大土被り厚120m、道路幅員6.5mの山岳トンネルである。表-1に工事概要、図-5に支保パターン（DⅠ）を示す。トンネル周辺は、利賀川の東北側に伸びる尾根と北西側に伸びる尾根とに囲まれた三角形の地域で、斜面勾配40°を超える急峻な地形となっており、全体に崩壊地、崩壊跡地が分布している。施工地周辺の地山の弾性波探査の基盤速度は、4.0～4.8km/secであり、低速度帯（2.1km/sec）も確認された。地山は、花崗岩および花崗閃緑岩を主とした硬質岩であるが、一部ヒン岩の貫入による岩相の変化や弱い変質の箇所も見受けられる。また、起点側坑口付近では、破碎帯の露岩が確認されている。

(3) 検証結果

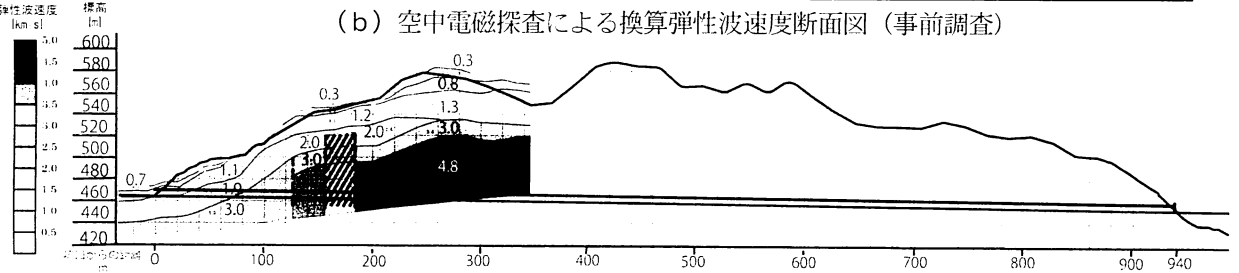
i) 実績地山等級との比較

空中電磁探査法の解析結果（図-6（a），（e））を起点側から終点側に向けて検討する。坑口部からD等

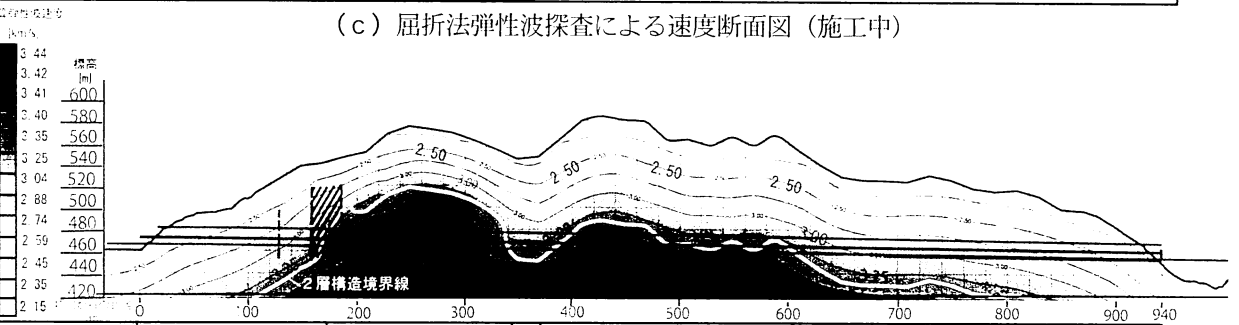
坑口からの距離 [m]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	940
事前 換算弾性波速度 [km/s]	<2.0			3.5 ~ 4.0			3.0 ~ 3.5		2.5 ~ 3.0		2.0
設計地山等級	DⅢ	DⅠ		CⅠ					DⅠ		DⅢ
施工中 弾性波速度 [km/s]											未調査
弾性波探査地山等級	DⅠ		CⅠ	DⅠ	B						
施工後 換算弾性波速度 [km/s]	2.37 ~ 3.25		3.25 ~ 3.44	3.19	3.25 ~ 3.44				3.22 ~ 2.15		
換算弾性波地山等級	DⅠ			DⅠ					DⅠ		
比抵抗コントラスト			-0.18 ~ 0.39		-0.18 ~ 0.39						
最終推定地山等級	DⅠ			DⅠ					DⅠ		
施工実績地山等級	DⅢ	DⅠ		DⅠ					DⅠ		DⅢ



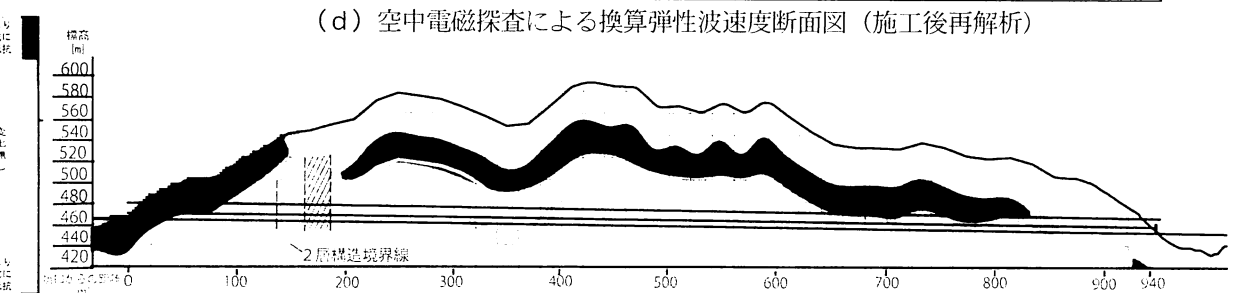
当初換算弾性波速度	<2.0	2.5 ~ 3.0		3.5 ~ 4.0			3.0 ~ 3.5		2.5 ~ 3.0		<2.0
当初設計地山等級	DⅢ	DⅠ		CⅠ					DⅠ		DⅢ



弾性波速度 [km/s]	1.9	3.0	4.0	2.1	4.6						未調査
弾性波探査地山等級	DⅠ		CⅠ	DⅠ	B						



換算弾性波速度値	2.37 ~ 3.25		3.25 ~ 3.44	3.19	3.25 ~ 3.44				3.22 ~ 2.15		
換算弾性波地山等級	DⅠ			DⅠ					DⅠ		



比抵抗コントラスト			-0.18 ~ 0.39		-0.18 ~ 0.39						
最終推定地山等級	DⅠ			DⅠ					DⅠ		
施工実績地山等級	DⅢ	DⅠ		DⅠ					DⅠ		DⅢ

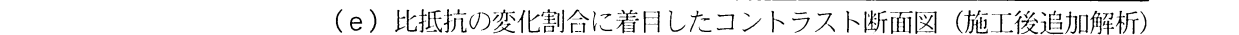


図-6 押谷トンネルにおける調査解析トンネル縦断面図

級地山が約 220m間続き、その後C等級となるが、起点側坑口より 340m 付近においてD等級の地層を 60m挟み、C等級に戻り、終点側坑口までの 340m 間はD等級となっている。

この結果をトンネル掘削時の実績地山等級と比較すると、両坑口付近の地山については、解析結果もD等級となり、弱部を捉える事ができたと考えられる。また、起点側坑口より 350m付近（土被り 90m）の不良地山区間も捉えられている。しかし、空中電磁探査法では起点側坑口部から約 600m より終点側はDⅠと判断されたが、実績ではDⅠが出現するのはこれよりさらに 90m 終点側であった。この違いは、比抵抗構造が低角度になる区間で誤差が生じ、深度方向の誤差を内包していることが原因と考えられる、表-2 に対比検証結果を示している。

ii) 弾性波探査との比較

押谷トンネルでは、起点側坑口部から 360m の区間で弾性波探査を実施し、他の地質調査成果と合わせて解析を行っている（図-6（a）,（c））。

弾性波探査では、起点側坑口からD等級地山が約 130m間続き、その後、約 30m間はC等級、さらに約 30m間はD等級となり、起点側坑口より約 190m 地点から350m までの約 160m間はB等級と判定している。

この弾性波探査結果と施工実績地山等級を比較すると、図-6 に示すように大きな土被り区間で誤差が生じている。土被りが 90～105mである範囲で、弾性波探査ではB等級と判定した区間は、地山等級がD等級ないしC等級と違っている。弾性波探査では、弾性波速度の逆転層やブラインド層がある場合、上層の結果を反映して結果に誤差が生じる場合がある⁷⁾。今回の調査箇所でも、岩相の変化が激しく土被りが大きいため、上層の比較的健全な岩の結果に隠れて、下層の弱部を反映出来なかった結果と推測される。

6. 施工直前の利賀トンネル3工区の再解析

押谷トンネルで、施工実績地山等級、弾性波探査、空中電磁探査法の比抵抗解析の結果を対比した結果、施工時に確認された湧水や支保パターンと調和的な地山状況が把握できることが確認された。この結果を踏まえ、施工直前の利賀トンネル3工区に対して同一の条件で高精度比抵抗解析を行った。

(1) 利賀トンネル3工区の概要

調査対象の利賀トンネル3工区は、延長1 140m、最大土被り厚150m、道路幅員7.5mの山岳トンネルである。

表-3に工事概要、図-7に支保パターン（DⅠ-b）を示

表-2 押谷トンネル対比検証結果

地山等級	設計 （事前調査）	施工実績	新解析手法による 検討結果
B	0%	0%	0%
CⅠ	50%	0%	0%
CⅡ	18%	47%	35%
DⅠ	32%	50%	65%
DⅡ	0%	3%	0%

表-3 利賀トンネル3工区工事概要

項 目	工事内容
延 長	L=1 140m
断 面	掘削断面積A=59.8㎡（CⅡ）、60.8㎡（DⅠ）
施 工 法	NATM工法
掘削方式	発破工法
掘削工法	CⅡ（全断面掘削工法） DⅠ、DⅢ（補助ベンチ付全断面掘削工法）
補助工法	フォアボーリング、長尺フォアパイリング 長尺鍬ボルト、鍬吹付け

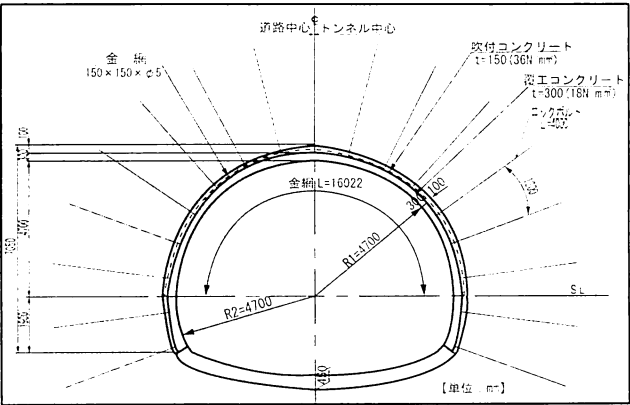


図-7 利賀トンネル3工区支保パターン（DⅠ-b）

す。

弾性波探査および地表踏査の結果、図-8（b）に示すように弾性波探査の基盤速度は4.3～5.4km/secであり、4箇所の低速度帯1.6～3.0km/secも確認された。一般部の地山性状は、堅固なCM～CH級岩盤の花崗閃緑岩が主体で目立った脆弱部は認められない。しかし、所々に認められる貫入岩（ヒン岩）は、堅硬なCM級岩盤であるが、その境界部分に変質し脆弱化しており、部分的に不良地山になっていると推定された。

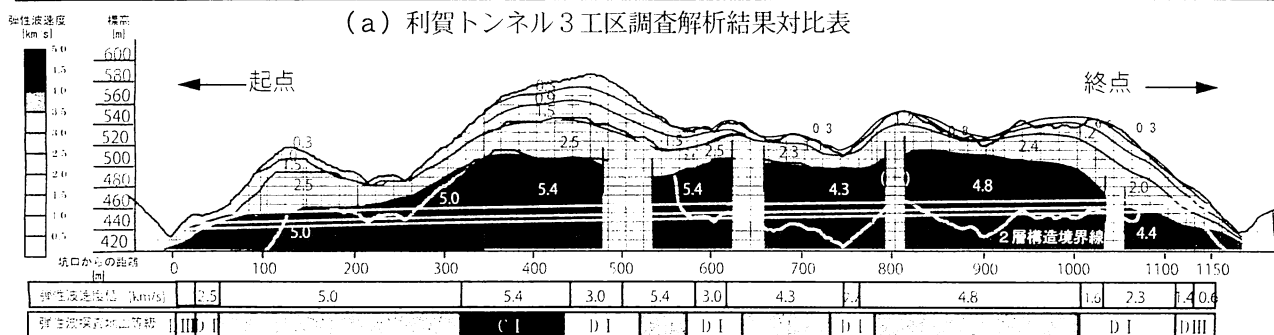
(2) 新解析手法による地山等級区分結果

高精度比抵抗解析による地山等級と弾性波探査をもとに設計された当初の地山等級を比較した結果、弾性波探査でCⅡ等級とした区間は、再解析の結果、換算弾性波速度が3.25km/s未満の区間が主体であり、比抵抗値の変化の割合が激しいこと（図-8（d））から不安定な地山が分布するD等級区間とされた。

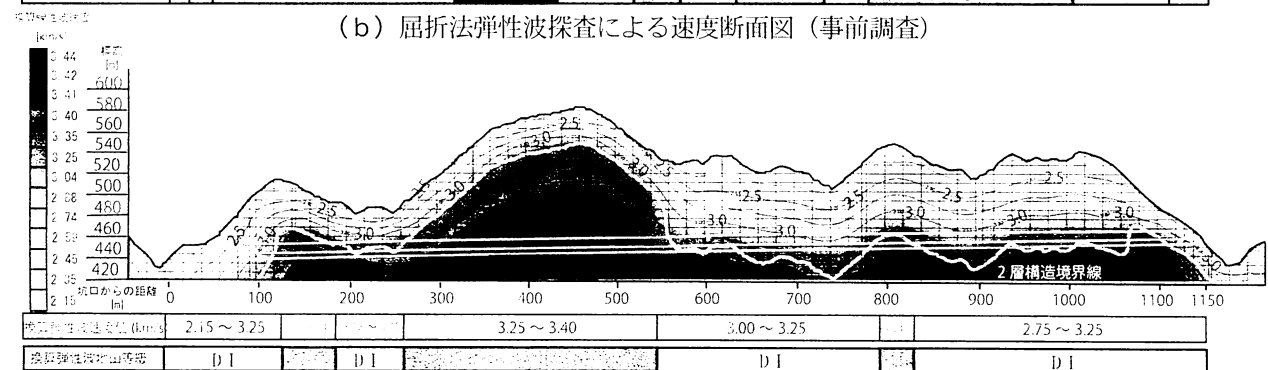
図-8に示すように起点側から320～530m間の土被りが

掘削方向距離 [m]	0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200
弾性波速度値 [km/s]	2.5	5.0	5.4	3.0	5.4	3.0	4.3	2.4	4.8	1.4	2.3	1.4	0.6
弾性波探査地山等級	III	I	C I	D I	I	D I	I	D I	I	D I	D III		
換算弾性波速度値 [km/s]	2.15 ~ 3.25		3.25 ~ 3.40		3.00 ~ 3.25				2.75 ~ 3.25				
換算弾性波地山等級	D I	D I	D I		D I				D I				
比抵抗コントラスト	0.18 ~ 0.39		0.18 ~ 0.39		0.18 ~ 0.39				0.18 ~ 0.39				
最終推定地山等級	D I				D I				D I				
施工実績地山等級	施工中	D I			D I				D I				D III

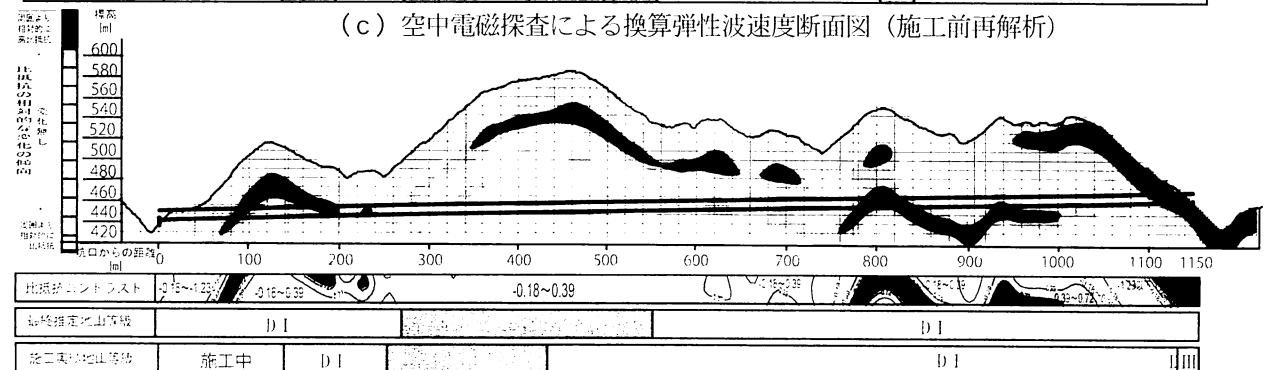
(a) 利賀トンネル3工区調査解析結果対比表



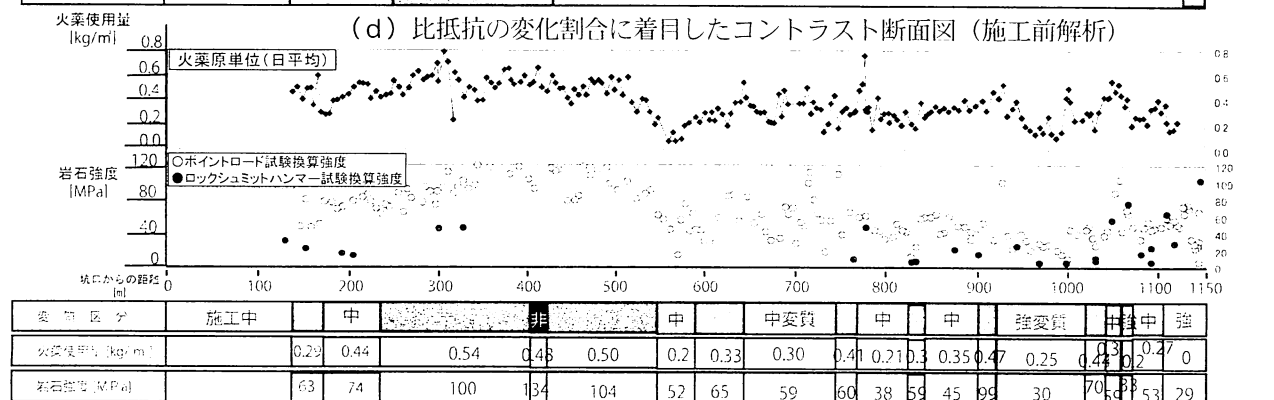
(b) 屈折法弾性波探査による速度断面図（事前調査）



(c) 空中電磁探査による換算弾性波速度断面図（施工前再解析）



(d) 比抵抗の変化割合に着目したコントラスト断面図（施工前解析）



(e) 熱水変質区分と岩石強度・火薬使用実績

図-8 利賀トンネル3工区調査解析縦断面図

90～150mの大きい区間において弾性波探査ではCⅠ～DⅠ等級と判定した区間は、換算弾性波速度が3.25km/s以上を示した。また、計画トンネル位置は二層構造線よりも下位であり、比抵抗値の変化の割合も少ないことから、この区間は、安定した地山が分布するCⅡ等級区間と判断された。

7. 利賀トンネル3工区の施工結果

(1) トンネル施工結果

3工区トンネルは、終点側から着手した。しかし、掘削当初から想定より脆弱な地山が出現し、表-4に示すように、終点側坑口部のDⅢパターンを除く既掘削区間（延長約970m区間）の約8割超がDⅠパターンで掘削された。

地山中には、網目状、脈状に変質粘土薄層が挟在し、変質の激しい区間では、切羽崩壊、肌落ちが頻発、火薬使用量は当初想定約50%で、部分的にブレイカーによる機械掘削を実施した。

i) 粘土X線回析分析結果

DⅠ、CⅡ等級区間において、切羽に分布する粘土薄層のX線回析分析を行った。各試料には雲母鉱物や緑泥石、方解石、濁沸石が共通して認められ、地山状況は、当初想定された新鮮な花崗閃緑岩と異なり、その大部分が安山岩質岩脈の貫入に伴う中性の熱水によって起こる熱水変質作用（プロピライト化作用）⁹⁾を受けていることが明らかになった。

ii) 岩石・地盤強度試験結果

岩石強度は、掘削時に採取した掘削ズリを用いてポイントロード試験により測定した。事前調査で実施した近傍ボーリングコア（CL～CH）による一軸圧縮試験結果と比較するとほぼ同様の傾向を示し、岩片は比較的硬質であった。

一方、亀裂等の影響が含まれた地山強度は、掘削時の切羽において実施したロックシュミットハンマー試験から換算した。表-5に示すように、DⅠ等級区間では、岩盤強度（平均値）が岩石強度の1/3程度まで低下し、CⅡ等級区間でも70%程度まで低下している。これは亀裂の発達や熱水変質作用に伴う粘土薄層の挟在が大きく影響していると考えられた。

(2) 施工実績地山等級との比較

図-8（a）および（d）に示すように、実績地山等級は、現在の掘削地点（起点側坑口より約140m）から約115mはD等級地山で、その後約180m間がCⅡ等級とな

表-4 利賀トンネル3工区対比検証結果

地山等級	設計 (事前調査)	施工実績	新解析手法 再解析
B	0%	0%	0%
CⅠ	12	0	0
CⅡ	57	15	30
DⅠ	30	81	70
DⅡ	0	0	0

表-5 岩石・岩盤強度試験結果

項目	岩石強度 (MPa)			岩盤強度試験 (MPa)	
	一軸圧縮	実績 (PL試験)		実績 (SH試験)	
	事前調査*	DⅠ	CⅡ	DⅠ	CⅡ
最小	10	9	73	4	45
最大	130	154	145	75	46
平均	70	59	110	22	46

*事前調査は、ダムサイトおよびトンネル周辺ボーリングコアの一軸圧縮試験結果

表-6 変質区分表

変質区分	状態
強変質	粘土がネットワーク状に発達し、変質が岩芯に及んでいる。
中変質	白色変質粘土介在亀裂が目立つ。
弱変質	白堊変質粘土を介在する亀裂が認められることがある。
未変質	非変質部（変質粘土は認められない）。

る。そして、起点側坑口より約430mから坑口手前約1120mまでの690m間にはD等級の地山が出現している。この結果を弾性波探査と高精度比抵抗解析結果で検証すると、当初CⅡ等級とされた4区間（合計650m間）では、起点側坑口から約250～320m区間の70m間を除き、実際はD等級で掘削が進められた。これを新たに実施した高精度比抵抗解析結果と比較すると、D等級の地山不良区間として比較的良く捉えている。

起点側から320～530mの高土被り区間において当初CⅠ、DⅠ等級と判定した区間の施工実績地山等級は、CⅡ、DⅠ等級であった。同区間を、空中電磁探査法は、CⅡ等級と判定しており、施工実績によるCⅡパターンは高精度比抵抗解析による想定位置よりも約130m進んだ地点から適用された。この相違区間（DⅠパターンを継続した区間）の地山性状は、変質度も弱く地山も硬質化の傾向が認められる等CⅡ地山に近い性状を示しはじめていたが、介在の粘土や湧水等の影響で切羽がやや不安定な状態が続いたため、安全性の観点からDⅠパターンでの施工を継続した区間に相当している。

起点側坑口から約560～820m間において、湧水の増加により防水シートを施工した。その中で、とくに湧水が顕著な720～820m区間については、高精度比抵抗解析結果の想定と概ね一致する。

(3) 熱水変質区分と岩石強度、火薬使用実績の関係

表-6に示すダムサイトの基礎岩盤における変質区分を用いて、トンネル切羽観察結果から熱水変質区分を行った。図-8（e）に示すように、高精度比抵抗解析で予測

されたとおり、変質区分がめまぐるしく変化する結果となった。地山は全体的に、熱水変質作用を受けており、一部影響を強く受けている区間では、地山の脆弱化が進み粘土層が厚く挟在していた。強度試験の結果と変質区分を対比すると、強変質区間の掘削ズリ強度は相対的に小さく、区間平均で29～33MPaであるのに対し、弱変質区間は、区間平均60～100MPa、非変質区間は134MPaと大きな値を示した。また、火薬使用実績（原単位）については、強変質区間で区間平均0～0.25kg/m³、中変質区間で平均0.20～0.44kg/m³、弱変質区間では平均0.29～0.54kg/m³の使用量であった。以上の掘削ズリ強度や火薬使用量は、トンネルの地山状況を良く表しており、熱水変質区分ともほぼ一致している。これらのデータと図-8（d）に示す比抵抗の変化の割合に着目して新たに解析した結果とを比較すると、良く整合しており、地山の変化を捉えていると考えられる。

8. まとめ

利賀ダム建設事業で現在施工中の利賀トンネルを対象に、空中電磁探査法の高精度比抵抗解析を行った。そして、そのデータをもとに、熱水変質作用を受けた花崗岩類の分布する山岳地帯のトンネル地山状態を明らかにしてトンネル地山を評価し、施工実績と比較検討した。

その結果、利賀トンネル3工区では、近接の押谷トンネルにおける地山状態を考慮した高精度比抵抗解析は、熱水変質による地山不良や湧水の多い区間を明確に表していた。

熱水変質作用の影響は、地下深部の熱源の分布に大きく依存するので、地質踏査や弾性波探査のみではその影響の把握は困難である。熱水変質の恐れのある地山では空中電磁探査法等による高精度比抵抗解析を実施し、総合的に地山評価を行うことが有効であるとわかった。

また、今回近接トンネル施工データをもとにした解析が地山評価の精度向上に繋がったことから、近接トンネ

ル施工データや、当該トンネル着手段階の施工データを利用する高精度比抵抗解析が、事前地山評価の精度向上においても非常に有効と考える。

利賀ダム建設事業では、今後最大 372m の土被りの大きい利賀トンネル1工区、2工区、延長 4.98km の掘削を予定している。トンネル計画部の地質は、花崗閃緑岩主体で良好な地山（B、C I）と予想され、長孔発破により1掘進長を延伸することによりコストの縮減を図る計画である。計画したトンネルを確実に施工するには、事前調査の段階で的確に地山状態を把握することが重要であり、本研究で有効性を確認した高精度解析手法を活用し、安全で確実にコスト縮減、工期短縮を図って行く予定である。

参考文献

- 1) 鈴木昌次, 古川浩平, 井上洋司, 中川浩二: NATM 施工実績に基づく事前設計の評価に関する一考察, 土木学会論文集, No.427/VI-14, pp. 261-270, 1991.
- 2) 物理探査学会: 新版 物理探査適用の手引き—土木物理探査マニュアル 2008, pp.249-263, 2008.
- 3) 松井保, 朴三奎, 上出定幸: 比抵抗高密度探査結果による山岳トンネルの地山分類手法, トンネル工学研究論文, 報告書第6巻, pp.9-14, 1996.
- 4) 河戸克志: 平成 20 年度香川県地盤工学研究会 第1回学術講演会テキスト, 2008.
- 5) 濱田康司, 長谷川修一, 河戸克志, 三谷浩二, 石井義信: 空中電磁法を用いたトンネル地山等級の補正方法の提案, 地盤工学会四国支部平成 21 年度技術研究発表会講演概要集, pp.15-16, 2009.
- 6) 日本道路協会: 道路トンネル技術基準（構造編）・同解説, pp.76-82, 2003.
- 7) 土木学会: トンネルにおける調査・計測の評価と利用, pp.52-53, 1999.6
- 8) 富田克利, 香月裕宣, 黒岩寛明, 山本温彦, 大庭昇: 鹿児島県坊ノ津町南部の粘土鉱物および沸石の研究, 鹿児島大学理学部紀要（地学・生物学）, No. 19, pp.67-86, 1986.

APPLICATION OF HELICOPTER-BORNE ELECTROMAGNETIC METHODS TO TUNNEL ROCK MASS EVALUATION IN GRANITE THAT RECEVES HYDROTHERMAL ALTERATION.

Toshihide SUGIMOTO, Katsushi KAWATO and Hideo SAKAI

This paper shows the application of helicopter-borne electromagnetic methods to tunnel rock mass evaluation in granite suffered hydrothermal alteration. We executed new analysis to improve deep resistivity value in Toga tunnel. We examined the fault and the spring water point in tunnel by a new contrast analysis by the use of the change ratio of the specific resistance value. After the tunnel was constructed, we compared rock mass evaluation for the natural and the analysis result. We concluded that a new analysis of electromagnetic method was effective for rock mass evaluation of tunnel.