

# 堤防開削調査による電気探査の適用性検討

応用地質株式会社 ○横井 恵太, 大藪 剛士, 塚田 秀太郎, 小泉 慎太郎

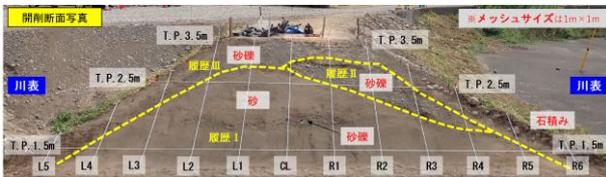
## 1. はじめに

河川堤防は、治水に際してその都度嵩上げや拡幅による補強がなされてきており、構造（築堤履歴）が複雑な土構造物である。堤防開削調査は、樋門等の河川構造物を構築する際に行われ、堤体の土層構成の把握、築堤履歴等を確認することで、堤防の質的向上を検討する際の基礎資料を得ることを目的に実施される<sup>1)</sup>。

本稿では、堤防の耐震対策工事に伴い開削した堤防断面において室内土質試験、現場透水試験、山中式土壤硬度測定及び、簡易電気探査を実施し、その結果、特に土壤硬度と比抵抗値に相関性がみられたことからその結果を中心に報告する。

## 2. 開削断面の築堤履歴及び調査方法

既往の文献資料をもとに開削断面の築堤履歴を調査した結果、築堤履歴は大きく3回に分けられ、江戸時代後期に築堤（履歴Ⅰ）された後、明治から昭和の中期にかけて2回拡築されている（履歴Ⅱ、Ⅲ）。開削断面の観察の結果、履歴Ⅰは粒径が均一な中砂主体の砂質土、履歴Ⅱ、Ⅲは砂礫や礫混じり砂を主体としている（写真-1）。



＜開削断面＞※メッシュは1m 格子



写真-1 開削断面および各築堤履歴の土質状況

表-1に、実施した室内土質試験内容一覧表を示す。現場透水試験の手法は図-1に示す GPI 法を用いた<sup>2)</sup>。また、簡易電気探査は電極棒を鉄丸釘 (N65) とした携帯型の装置（試作品）を用いて試行的に実施した（写真-2）。

表-1 実施した室内土質試験内容一覧表

試験項目	準拠する基準・規格番号
土粒子の密度試験	JIS A 1202
土の含水比試験	JIS A 1203
土の粒度試験	JIS A 1204
土の液性限界試験	JIS A 1205
土の塑性限界試験	JIS A 1205
土の湿潤密度試験	JGS 0191
突固めによる土の締固め試験	JIS A 1210

JIS：日本産業規格  
JGS：地盤工学会基準

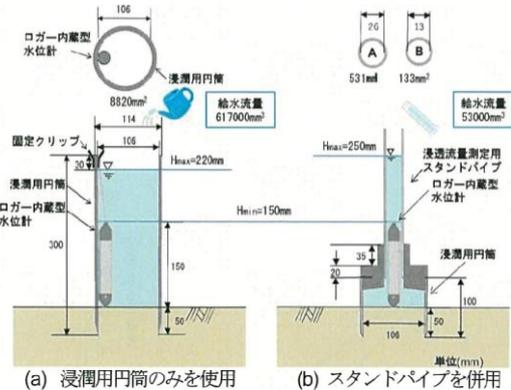


図-1 現場透水試験装置(GPI法)<sup>2)</sup>



写真-2 簡易電気探査状況

## 3. 調査結果

### (1) 物理特性

表-2に、築堤履歴毎の代表的な試験結果を示す。

履歴Ⅰは砂分を主体としているが、湿潤密度は  $\rho_t = 1.664 \text{ Mg/m}^3$  と相対的に小さく、履歴Ⅱ及び履歴Ⅲは礫分を含んでおり、湿潤密度は  $\rho_t = 1.914 \sim 1.942 \text{ Mg/m}^3$  と相対的に大きな値を示している。

図-2に、築堤履歴毎の粒径加積曲線を示す。履歴Ⅰの粒径加積曲線は立っており、均等係数  $U_c = 1.58 \sim 2.29$  の範囲にあることから粒径が均一な材料であるといえる。

表-2 築堤履歴毎の代表的な試験結果一覧表

築堤履歴	履歴Ⅰ	履歴Ⅱ	履歴Ⅲ
試料	OL1(-1)	R2R3(0)	OL1(0)
土粒子の密度 $\rho_s$ (Mg/m <sup>3</sup> )	2.722	2.715	2.714
自然含水比 $w_n$ (%)	5.2	4.3	3.3
粒度	礫分 (%)	0.1	60
	砂分 (%)	95.5	37.4
	シルト分 (%)	4.4	2.6
	粘土分 (%)	4.75	75
締固め	試験方法	A-c	B-c
	最大乾燥密度 $\rho_{dmax}$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.642	2.045
	最適含水比 (%)	17.2	7.3
分類	分級された砂	分級された礫質砂	分級された礫質砂
分類記号	(SP)	(SPG)	(SPG)
現場密度試験	湿潤密度 $\rho_t$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.664	1.942
	乾燥密度 $\rho_d$ (Mg/m <sup>3</sup> )	1.549	1.862
	締固め度 (%)	94.3	91.1

(2)透水系数

図-3に、現場透水試験結果を開削断面図上に示す。

開削調査箇所は全般に透水性が高い材料で構成されている。

履歴Ⅰの透水系数は $10^{-4}$ m/s オーダーであり、一般的な砂よりもやや透水性が高い。これは、粒形が均一な材料であり間隙が大きいことに起因している。

履歴Ⅱは $10^{-3}$ m/s オーダーと透水性が高く、履歴Ⅲは $10^{-4}$ m/s 程度を示す。

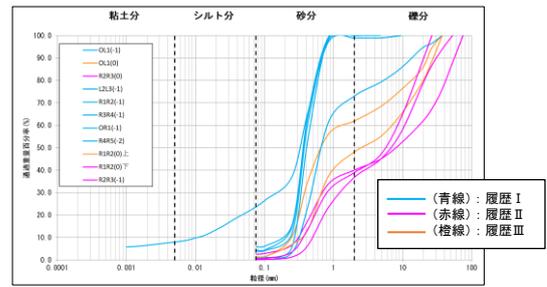


図-2 築堤履歴毎の粒径加積曲線

(3)土壌硬度および比抵抗値

図-4に、開削面のメッシュの交点毎に測定した土壌硬度のコンター図を示す。土壌硬度は、試験時に測定した貫入量から式-1により算出した。履歴Ⅰは、履歴Ⅱや履歴Ⅲと比較してやや緩い状態にあるが、履歴Ⅰの中でもばらつきがみられる。特に履歴Ⅰの下位のゾーンで相対的に土壌硬度が低いことから、当ゾーンは堤体土ではなく自然堤防の可能性も考えられる。

$$P = 10X / 0.7952(4-X)^2 \times 98.1 \quad \dots \text{式-1}$$

ここで、P: 土壌硬度 (kN/m<sup>2</sup>)  
X: 貫入量 (cm)

図-5に、開削面のメッシュの交点毎に測定した比抵抗値の分布図を示す。比抵抗値は200~2000 Ω・m を示し、一般的な礫材の範囲にある。履歴Ⅰは、概ね履歴Ⅱ及び履歴Ⅲと比較し相対的に高比抵抗値を示す。特に履歴Ⅰの下位のゾーンでの比抵抗値が相対的に高く、これは図-4に示した土壌硬度による相対的に緩い箇所と概ね一致している。図-6に、土壌硬度と比抵抗値との関係図を示す。土壌硬度と比抵抗値との相関性が高く、今回の開削断面での比抵抗値の違いは地盤の締まり具合が大きく起因しているものと考えられる。

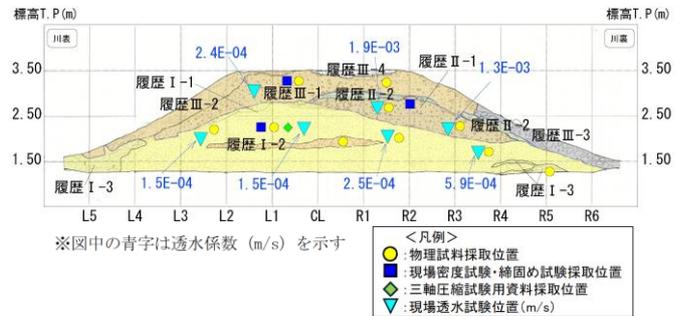


図-3 現場透水試験結果図

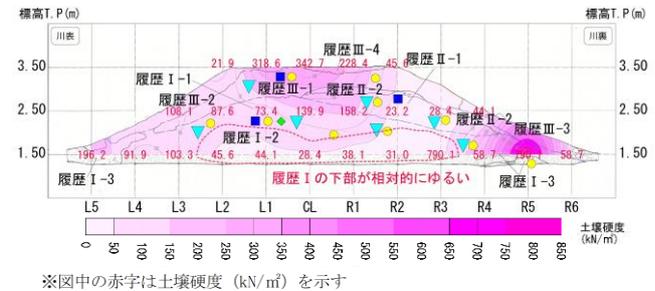


図-4 土壌硬度分布図

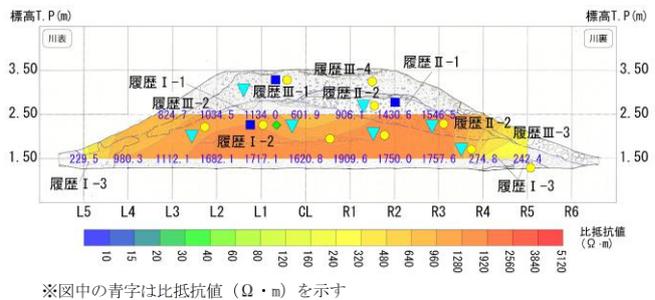


図-5 比抵抗分布図

4. おわりに

河川堤防の開削調査は、通常ならばボーリング等の点データしか確認できない堤体の土層構成や築堤履歴等を現地で確認できる貴重な調査である。今回実施した開削調査では築堤履歴が大きく3回に分けられ、土質構成は砂質土～礫質土を主体とするが、江戸時代後期に築堤された履歴Ⅰは粒径均一な砂質土であった。開削断面において、室内土質試験のほか、現場透水試験、土壌硬度測定及び、簡易電気探査を実施した結果、土壌硬度と比抵抗値に相関性がみられ、地盤の締まり具合を比抵抗値で検出できる可能性も確認できた。一方、今回の調査では透水系数に大きな差異が見られなかったことから比抵抗値との有意な関係が把握できていない。

今後も現地調査を通じて各調査手法の適用性を検討していく。

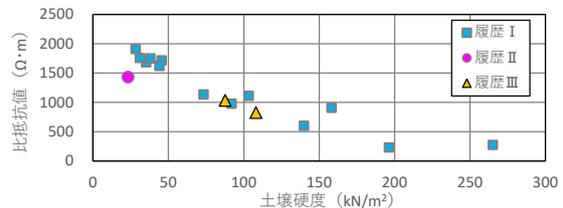


図-6 土壌硬度と比抵抗値の関係図

《引用・参考文献》

- 河川堤防開削時の調査マニュアル(2011)：国土交通省 河川局治水課。
- 竹下祐二, 三木愛実, 池田 結 (2021)：簡易型変水位透水試験による現場飽和透水系数の原位置測定方法, 土木学会論文集C (地圏工学), Vol. 77(No. 3), 。

# 電気探査及び弾性波探査、放射能探査を用いた温泉物理探査事例

株式会社キタック ○古田嶋 峻大, 金岡 民善

## 1. はじめに

土木設計や施工を行う上で基礎資料となる地質調査は非常に重要である。地質調査の中にも様々な種類があるが、その中で代表的なものとしてボーリング調査がある。ボーリング調査は地面を掘削し土質サンプルの採取や原位置試験を実施することで基礎地盤の性状を調査する手法である。ただし源泉の湧出が地表に近い温泉地でボーリング調査を行う際は掘削により源泉の利活用に影響を及ぼすことが懸念される。安全にボーリングを実施し、源泉の利用に影響を及ぼす可能性が少ない手法を用いて基礎地盤の性状を把握し、ボーリング調査の補完資料とすることが重要である。

本稿では温泉地で計画されているボーリング調査に先んじて非破壊検査である物理探査を実施し、地質構造や地下水の分布状況を確認した事例について報告する。

## 2. 調査概要

### (1) 経緯

当該地は温泉街に位置しており、温泉街中心部を流れる河川は河川整備計画では改修区間に位置付けられている。地質調査及び施工の実施に伴い、源泉に影響を及ぼす可能性が否定できないため、これらの実施を前に当該地の地質性状及び地下水（温泉水）位置を概略的に把握する必要があった。

### (2) 調査地の地質

当該地全域の基盤岩は主に花崗閃緑岩から構成するが、北西方向に貫入する安山岩やアップライトの岩脈が確認できる。貫入している岩脈は北西方向の直線形を示しており、岩質が破碎されているほか、熱水変質作用を受け、暗色に変色している。温泉地の源泉は基盤岩の断層や亀裂等の破碎帯を介し地表に湧出している。

### (3) 実施した物理探査の概要

地下水（温泉水）の分布把握を目的とした調査では電気探査手法を用いることが一般的であるが、電極を地盤に打ち込む必要があるため、舗装箇所での実施が困難であることから、当該地舗装箇所では弾性波探査を用いた。

#### ・電気探査（比抵抗二次元探査）

電極から地下に電気を流すことにより、地下の電気的な性状を解析し、地盤の種類や分布、地質構造、特に地下水の分布状況などを調査する手法である。

#### ・弾性波探査（スタッキング法）

物性の異なる境界で弾性波が反射する性質を利用し、人工的に弾性波を発生させ、波を観測・解析することで地質構造を把握する手法である。

#### ・放射能探査

岩石中の亀裂に沿って上昇するガンマ線を観測することで岩盤に生じた亀裂等、破碎帯の箇所を把握する手法である。

### (4) 探査手法の問題点

#### ・電気探査

電極から地下に電気を流す性質上、金属構造物が埋設されている場合は金属の比抵抗値を計測するため、金属構造物付近は地下水調査及び土質性状の調査には不向きである。当該地においても消雪パイプが埋設されている箇所で金属による偽像を確認した。

#### ・弾性波探査

地下の地層構造を把握することを目的とした調査では弾性波探査が用いられることが一般的であるが、金属やコンクリート構造物が付近にある場合や埋設されている場合にはその信号を観測してしまうため、地層構造の把握が困難になる性質がある。当該地においても擁壁による偽像を確認した。

### (5) 物理探査測線の配置

探査測線は河川両岸に設置（図-1）し、測線長及び電極間隔は表-1の通りとした。また配置結果を空間的（準三次元的）に解析を行うため、河岸上部で2測線、河岸の法尻付近で1測線の計3測線を計画した。

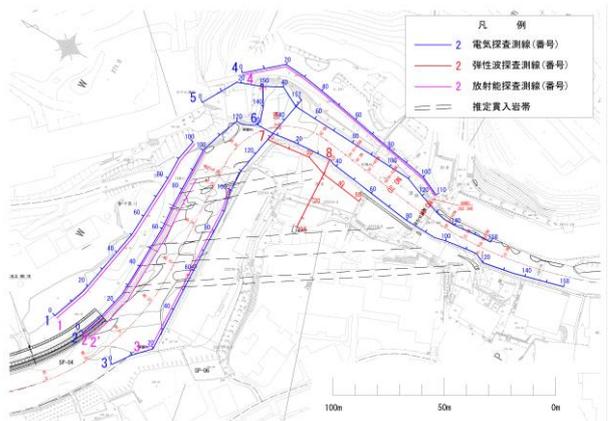


図-1 物理探査測線位置図

表-1 測線ごとの調査内容

測線名	電気探査			弾性波探査		放射能探査	
	測線長 (m)	電極間隔 (m)	探査深度 (m)	測線長 (m)	受信点間隔 (m)	測線長 (m)	受信点間隔 (m)
1	100	2	20	-	-	100	1~5
2	150	2	20	-	-	100	2.5~5
2'	-	-	-	-	-	85	2.5~5
3	152	2	20	-	-	85	2.5~5
4	110	2	20	-	-	110	2.5~5
5	158	2	20	-	-	-	-
6	158	2	20	-	-	-	-
7	-	-	-	50	2	-	-
8	-	-	-	34	1~2	-	-
合計	828	-	-	84	-	480	-

### 3. 調査結果

#### (1) 電気探査結果

目視可能な温泉湧出箇所（測線 4 140m～155m）は低比抵抗部に位置しており、岩盤の亀裂が確認できることから、当該地の温泉は岩盤の亀裂から湧出していると考察できる（図-2）。

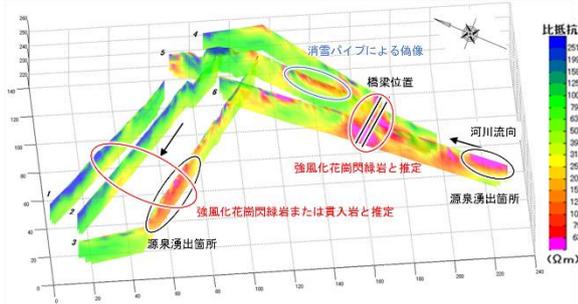


図-2 電気探査結果図

#### (2) 弾性波探査結果

一般的に弾性波速度は深度方向に従って増加する傾向を示し、当該地における速度構造もその傾向を示す。当該地で測定された弾性波速度は最大で 3.4 [km/s] であり、花崗岩の弾性波速度一般値 4.0 [km/s]～6.0 [km/s]<sup>1)</sup>より若干遅い結果となった。これは風化や熱水変質の影響を受けたためであると想定される。測線 7 の 25m～30m 間及び測線 8 の 15m 付近には低速度帯（2.0 [m/s] 程度）を確認できる。これは貫入岩又は花崗岩の破砕帯であると考察される（図-3）。

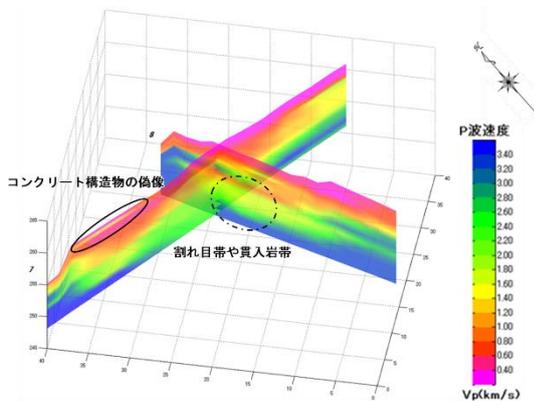


図-3 弾性波探査結果図

#### (3) 放射能探査

一般にガンマ線量は健全な岩盤や亀裂が密着した岩盤では値が低く、亀裂が卓越する箇所では高い値を示す傾向が見られる。

当該地では表土の被覆がある区間では相対的に低いガンマ線量が計測され（概ね 0.06～0.08  $\mu$ Sv/h 程度）、露岩する箇所（測線 3）ではガンマ線量のブレが大きい相対的に高いガンマ線量が計測された（概ね 0.09～0.14  $\mu$ Sv/h 程度）。各測線におけるガンマ線量が平均値よりも高い箇所は河川下流側に位置している。このことから岩盤亀裂は河川下流側分布していると考察される（図-4、図-5）。

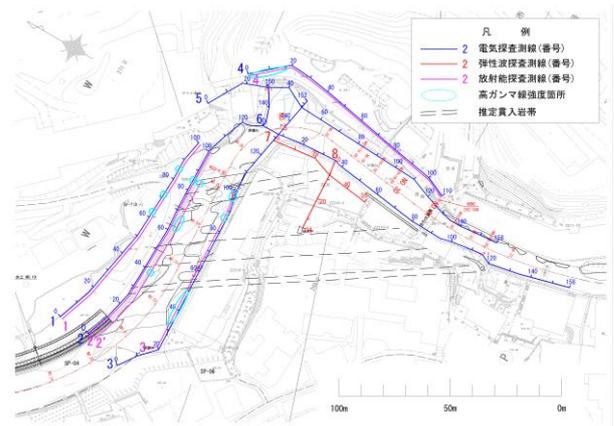


図-4 放射能探査結果図

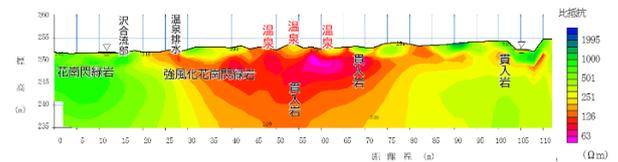
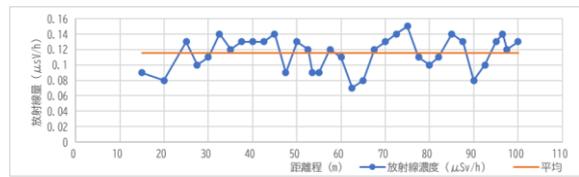


図-5 測線 3 の放射能探査と電気探査比較図

#### 4. まとめ

物理探査結果より岩盤の亀裂及び地下水を示す測定値は河川左岸側に集中していることが分かった。このことから河川右岸側での掘削が源泉の利活用に影響を及ぼす可能性は低いと考察し、調査ボーリング位置は当初計画位置の通りとした。調査に際して温泉噴出時の対処法を立案した後、現場作業を実施した。

#### 5. おわりに

温泉地では源泉の湧出量確保は重要な問題であり、そのような箇所で調査・施工を行う際には源泉に影響を及ぼさないことに留意する必要がある。当該地のように広範囲で温泉の湧出が確認される場所では、物理探査のような源泉に影響を及ぼす可能性が低い調査を行い、源泉湧出箇所の推定を行うことは、掘削作業で源泉の利活用に影響を与えないよう留意するにあたり、非常に有効な手法であると考えられる。また探査の際は、実際の湧出箇所でデータの測定を行い測定値の比較を行うことが望ましいと考える。

#### 《引用・参考文献》

- 1) 日本道路協会：道路トンネル技術基準（構造編）・同解説（1989）p48

# レーダー探査を使用したトンネル補修設計事例

基礎地盤コンサルタンツ株式会社 ○池澤 彩、植田 健太

## 1. はじめに

矢板トンネルは、施工時のコンクリート打込み不良等により覆工コンクリート背面に空洞が発生しやすい。

本稿では、矢板トンネルの背面空洞に対するレーダー探査を使用した対策工設計事例について示す。

## 2. 対象トンネルと定期点検結果

### (1) 対象トンネル

対象トンネルは、三重県が管理する矢板トンネルである。完成から50年以上経過しており、延長は284m、幅員4.5m、1車線の狭いトンネルである。(写真-1)



写真-1 起点坑口

### (2) 定期点検結果

前回の定期点検の健全性診断で、「予防保全段階」はうき、漏水、目地劣化が確認されている。「早期措置段階」で覆工部の打ち継ぎ目で覆工コンクリートの穴（欠落）が確認され(写真-2)、内部を確認した結果より背面空洞が判明した。

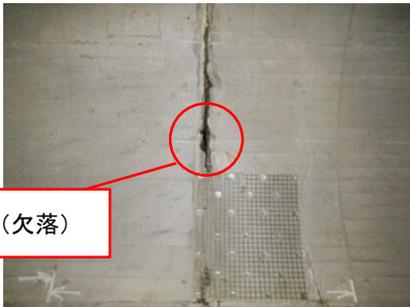


写真-2 点検時に確認された欠損

## 3. レーダー探査結果

### (1) 穴(欠落)周辺のレーダー調査及び孔内調査

点検で確認された覆工コンクリートの穴（欠落）の天端周辺でレーダー探査を5測線及び孔内調査を4箇所で行った(図-1)、調査範囲全体で空洞が解析より推定され、最大74cmの空洞が確認された。この調査範囲での全体空洞体積は27.03m<sup>3</sup>であった。

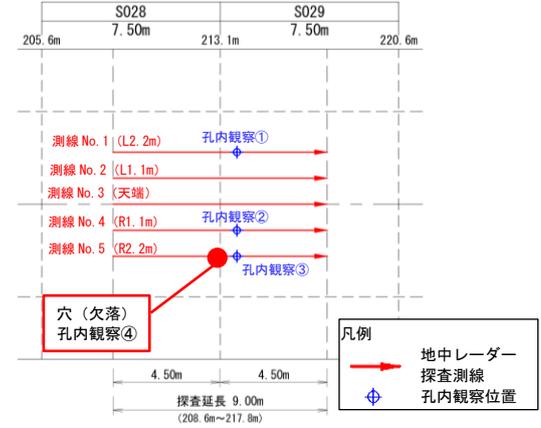


図-1 レーダー探査範囲

### (2) トンネル全体のレーダー探査

覆工コンクリート欠落部周辺だけではなく調査範囲全体で空洞が確認されたため、図-2に示すトンネル全延長のレーダー調査を天端と天端から左右2m 離れた車道端部真上の計3測線で実施した。解析結果より、最大空洞厚103cm、全体の空洞量は約216m<sup>3</sup>が推定された。

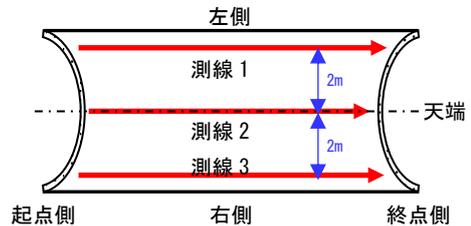


図-2 レーダー測線位置

### (3) 判定方法

#### ① 覆工内面の補強対策判定

覆工厚が不足している場合、覆工背面充填対策を実施する前に覆工内面補強対策を実施する必要がある。そこで「トンネル補修工法に関する手引き」<sup>1)</sup>(図-3)を参考に、平均覆工厚と最大空洞厚より、平均覆工厚が10cm以下、もしくは最大空洞厚70cm以上の際に平均覆工厚が15cm以下の箇所を対策が必要な箇所とし、III評価とした。該当しない箇所を対策不要とし、I評価とした。(表-1)

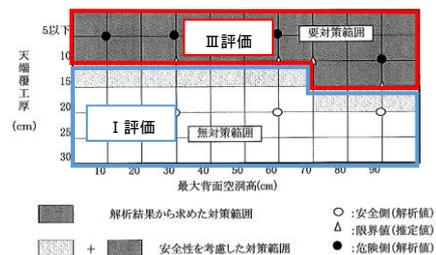


図-3 突発性崩壊の目安<sup>1)</sup>

表-1 覆工内面補強対策の要否

判定基準	評価
平均覆工厚 ≤ 10 cm	III
最大空洞厚 ≥ 70 cm の時、 平均覆工厚 ≤ 15 cm	
平均覆工厚 > 10 cm	I
最大空洞厚 ≥ 70 cm の時、 平均覆工厚 > 15 cm	

②空洞の突発性崩壊対策判定

空洞の突発性崩壊対策の判定は「道路トンネル維持管理便覧」<sup>2)</sup> (図-4) を参考に判断した。背面空洞厚30cm 以上かつ覆工厚30cm 未満の箇所はIV評価かIII評価に該当するが、点検結果や現地踏査結果よりトンネル全体で覆工面に大きな変状が確認されていないため、覆工の性状は良いと判断し、III評価とした。背面空洞厚30cm 以上かつ覆工厚30cm 以上の箇所はIIIかIIa 評価に該当するが、レーダー探査測線が車道真上であり、突発性崩壊が発生すると車両交通に影響するため、最大空洞厚30cm以上の箇所は平均覆工厚30cm を満たしていても対策が必要と判断し、III評価とした。また、最大空洞厚が30cm 未満の箇所は覆工厚に関係無く対策不要と判断し、I 評価とした。(表-2)

表-4.2.23 突発性の崩壊のおそれに対する対策区分の目安例<sup>3)</sup> (文献<sup>3)</sup>を加筆修正)

覆工巻厚	背面空洞深さ	
	大 <sup>注4)</sup> (30cm 以上程度)	小 (30cm 未満程度)
小 (30cm 未満程度)	III <sup>注3)</sup> , IV <sup>注3)</sup>	I <sup>注3)</sup>
大 (30cm 以上程度)	III <sup>注3)</sup> , IIa <sup>注4)</sup> , III <sup>注4)</sup>	I <sup>注3)</sup>

注1) 本表は矢板工法による道路トンネル(二車線程度)を想定した場合の目安例である。  
 注2) 判定にあたっては、背面空洞および巻厚不足箇所の平面的な広がりも考慮する。  
 注3) 地山の状態や覆工の性状が比較的良好な場合は、IIIとして判定することができる。  
 注4) 背面空洞が側面の場合、あるいは地山の状態や覆工の性状が比較的良好な場合は、IIaとして判定することができる。  
 注5) 背面空洞の深さが30cm 未満程度の場合は、覆工の性状や土砂流出の状態によって判定する。

図-4 突発性崩壊の目安<sup>2)</sup>

表-2 突発性崩壊対策の要否

判定基準	評価
最大空洞厚 ≥ 30 cm	III
最大空洞厚 < 30 cm	I

4. 対策範囲と対策方針

(1) 補修対策範囲

対象トンネルは終点スパン以外の全スパンで30cm以上の空洞が確認され、最終スパンも天端で最大28cmの空洞が確認されたため、対策範囲はトンネル全体とした。

(2) 対策方針

レーダー探査の結果より、全体的に空洞があることから、地山崩壊に対する耐荷力不足が考えられるため、外力対策を行うこととした。

5. 対策工の選定

(1) 工法選定

覆工背面に空洞を有する場合は、地山崩壊等の外力が作用するとその部分に曲げが発生し、コンクリートに引張応力が発生することにより、耐荷力が不足するため、背面空洞を残したままで内面補強等の裏込め注入工以外の対策を行っても効果が期待出来ない。このことから覆工背面の空洞を充填工により無くすることが必要であるため、裏込め注入工を選定した。

また、定期点検と現地踏査の結果より、覆工表面に外力による変状は確認されず、レーダー探査より全スパンにおいて、平均覆工厚が設計覆工厚25cm以上かつ判定基準を満たしているため、覆工の状態は良好とし、裏込め注入工のみで突発性崩壊への対策は可能と判断した。

(2) 注入材の選定

対象トンネルの空洞は最大厚103cmと設計覆工厚25cmの4倍以上のものが確認されており、充填量が多い。そのため、裏込め注入工における注入材は、単位重量が小さく経済性に優れている非セメント系の発泡ウレタンを採用案とした。

なお、対象トンネルは突発性崩壊防止の空洞充填が目的であるため、協議結果より剛性が小さい40倍発泡の発泡ウレタンで問題無いと判断した。

6. おわりに

対象トンネルは定期点検時に覆工欠落箇所の背面に空洞が確認され、レーダー探査実施に至った。レーダー探査の結果、トンネル全体に背面空洞が確認されたが、覆工表面に背面空洞が想定される変状は確認されなかったことから、定期点検時に背面空洞の可能性が低い場合でもレーダー探査等を実施することで早期に背面空洞を把握し、対策検討、施工実施することに繋がることを期待される。

《引用・参考文献》

- 1) トンネル補修工法に関する手引き(案)(2007年3月): 国土交通省中国地方整備局、p. 25
- 2) 道路トンネル維持管理便覧【本体工編】(2020年8月): 日本道路協会、p. 206

# レーダ探査を活用した城郭石垣の健全度評価

応用地質株式会社 ○中静 美波, 高瀬 尚人, 小林 恵, 竹内 幸輝  
盛岡市 佐々木 亮二

## 1. はじめに

近年、地震や台風・集中豪雨等の自然災害により、石垣の不安定化が進み、崩落等が各地で発生している。

文化庁は、大地震等の災害で人命に重大な影響を与えないことを目標として「石垣耐震診断指針(案)」を策定し、診断手法の検討を進めている。その診断を行っていく上で、石垣の形状・性状把握や石垣背面の構造調査結果を用いることを挙げている。

本稿では、石垣の背面構造を推定する非破壊調査手法として石垣のレーダ探査を紹介し、レーダ探査による石垣調査が耐震診断指針の健全度評価の基礎データになり得ることを報告するものである。

## 2. 文化庁の石垣耐震診断指針

### (1) 石垣耐震診断指針とは

石垣耐震診断指針は、石垣の耐震対策を進めるにあたって推奨される標準的な手順や方法と、補強を行うにあたって取り得る補強方法や留意点をまとめ、外力に対する工学的な検討と対策方法について示したものである。対象は、主に特別史跡・史跡に指定されている中・近世城郭の石垣、及び国宝・重要文化財(建造物)の基礎となっている石垣のうち、石垣の最も高い部分が高さ1m以上かつ天端、下端長さがいずれも3m以上の石垣である。診断の流れは図-1の通りであり、耐震診断は「予備診断」、「基礎診断」、「専門診断」の三段階からなる。

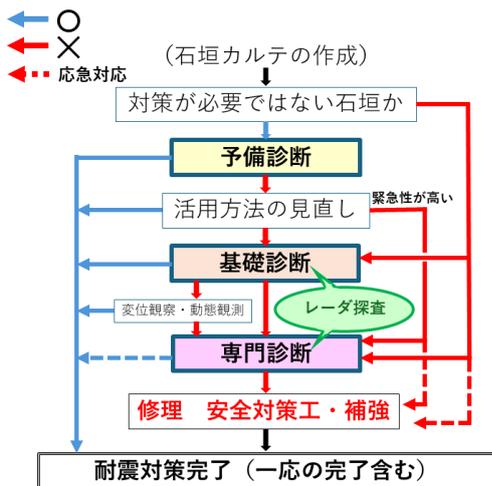


図-1 石垣耐震診断指針の簡略フロー<sup>1)</sup>

### (2) 石垣調査の手法に関して

石垣耐震診断指針の診断では、「基礎診断」において『(非解体による)石垣の形状・性状把握』、「専門診断」において『石垣背面の構造調査』を挙げている。その詳細な調査手法などは現在文化庁において検討が進められ

ているところであるが、我々は非破壊による石垣の形状・性状および石垣背面の構造調査の手法としてレーダ探査が有用であると考えている。そこで石垣におけるレーダ探査の例として、盛岡城石垣の調査事例を紹介する。

## 3. 盛岡城における石垣背面構造調査

### (1) 探査概要

レーダ探査の概要を図-2に示す。

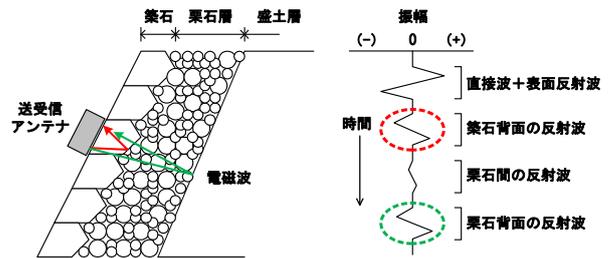


図-2 石垣背面の探査状況と波形模式

石垣表面に配置した送信アンテナから放射した電磁波は拡散・減衰しながら内部を伝播し、築石や栗石層の背面など異なる物質の境界で反射し、それらの反射波が受信アンテナで捉えられる。この築石や栗石層の厚さは伝播時間に電磁波速度を乗じて求められ、また石垣背面や栗石中に生じた空洞は、電磁波の反射振幅の大小から推定することができる。

盛岡城では、築石および栗石の層厚を連続断面として測定する『連続測定』、空隙・空洞位置を推定する『深度スライス解析』、築石の控え長を測定する『個別測定』を実施した。

レーダ探査の測定装置は SIR System 3000 (米国・GSSI社製)を用いた。連続測定では、中心周波数400MHzのアンテナを使用し、調査用に製作した台車にアンテナを固定してロープで石垣上端と下端にかけゆっくりと移動させながら測定を行った(写真-1)。



写真-1 盛岡城石垣における測定状況<sup>2)</sup>

また個別測定では、分解能が高い900MHzのアンテナを使用することで、築石控え長の計測精度を向上させている。

(2) 石垣背面断面推定結果(連続測定)

レーダ探査の記録と、石垣積み直し時の発掘調査結果を図-3に示す。

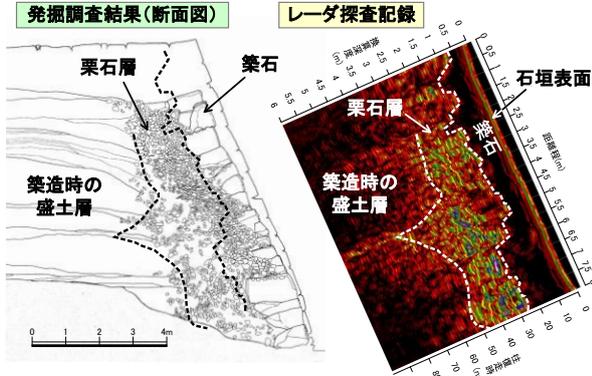


図-3 発掘調査結果とレーダ探査記録<sup>2)</sup>

レーダ探査記録において、換算深度0mの反射面が石垣表面であり、深部に向かって石垣背面が続く。石垣表面直下の反射振幅が弱い範囲(黒く抜けている部分)が築石石材であり、その下の反射振幅が強くなる境界面が築石石材と栗石層の境界を示している。栗石層は礫が集中して不均質であり、背後の地山や盛土と比べて強い反射として捉えられている。

当該石垣におけるレーダ記録では、築石、栗石層、盛土層が捉えられており、発掘調査結果と比較しても、その層厚や形状がよく整合していることがわかる。栗石層の厚さや盛土層の形状が分かると、石垣の不安定化が背面の構造に起因しているのか推察することができる。また、石垣築城当時の施工方法の推察にも活用でき、積み直しが必要になった際の検討材料にもなる。

(3) 深度スライス解析結果(連続測定)

石垣のレーダ探査においては、道路上や平坦地と同様に深度スライス解析を行う事ができる。盛岡城では測線間隔を1mに設定して深度スライス解析を行った。石垣表面から1.5m-2.5mの深度スライス解析結果を図-4に示す。

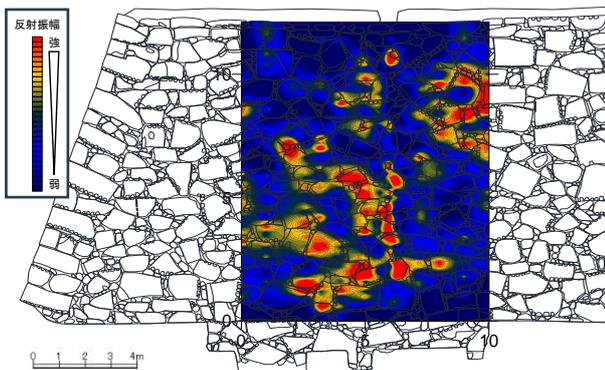


図-4 深度スライス解析結果(1.5m-2.5m)<sup>2)</sup>

石垣表面から1.5m-2.5mは盛岡城では築石から栗石

層に相当する。反射振幅の強い部分は石垣背面が不均質になっている箇所である。石垣背面の栗石の落ち込みなどにより空隙、空洞ができていている可能性を示している。

このように石垣背面の性状を深度スライス解析によって把握することで、今後雨や地震などの外的要因によって石垣背面がさらに不安定になる恐れがある箇所を抽出することができる。

(3) 築石の控え長測定結果(個別測定)

個別測定の一例を図-5に示す。

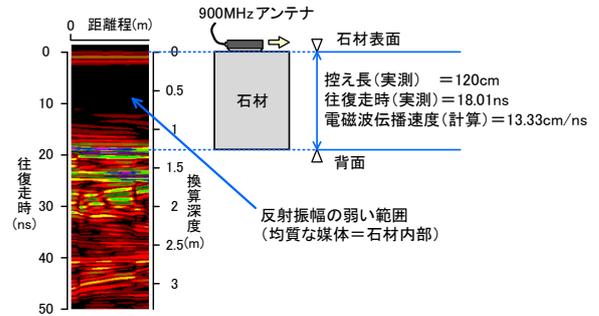


図-5 発掘調査結果とレーダ探査記録<sup>2)</sup>

連続測定と同様に、反射振幅の弱い範囲は均質な媒質であり、ここでは石材の内部を示している。個別測定では、築石の控え長が実測可能な隅石で背面までの往復走時を計測することにより、石材の電磁波伝搬速度を算出できる。これにより個々の築石の控え長を推定することができる。

ただし、石材の岩質等によっては築石背面からの反射が明瞭でない場合もあるため注意が必要である。

4. まとめ

城郭石垣のレーダ探査では、目的に応じた探査手法や解析方法を用いることにより、栗石層の厚さや盛土層の形状、石垣背面の不均質(空隙、空洞)箇所の抽出、築石の控え長等を把握することができる。

非破壊・非解体で石垣の形状・性状把握や石垣背面の構造を把握することができるレーダ探査は、石垣の健全度評価において有効である。今後は文化庁石垣耐震診断指針の健全度評価の基礎資料としての活用も見込まれ、さらにその必要性が高まると言える。

《引用・参考文献》

- 1) 文化庁「文化財石垣 耐震診断指針(案)」p.4の「図2診断の流れ」をもとに筆者作成
- 2) 盛岡市公園みどり課提供

【CO130】

岩盤斜面の緩み領域の推定を目的とした、弾性波探査結果とボーリング調査結果との整合について

大日本ダイヤモンドコンサルタント株式会社 ○小玉 聡、遠藤 理

1. はじめに

岩盤斜面の緩み状況を把握することを目的として、初めに弾性波探査により斜面の速度分布を求め、斜面の緩み領域を推定した。推定した緩み領域に対して、ボーリング調査を計画し、ボーリングコア状況及びボアホールカメラの観察結果と速度分布を比較した。その結果、弾性波探査で推定された岩盤斜面の緩み領域とボーリングコアの状況やボアホールカメラ解析結果は概ね整合が見られた。

2. 弾性波探査

弾性波速度は地層の硬軟、風化・変質の状況、割れ目の発達状況、断層の有無により変化する。その速度値は、良く固結した岩盤で高いが、風化が進み土砂化が進んだ岩盤では低くなる。本調査では、屈折法の原理を利用し弾性波探査を行った。原理は人工的に発生させた地震動のうち、縦波（P波）や横波（S波）が直接または異地層間で屈折して地層中を伝わっていく状況を地表で観測し、それを基にして地下の地質状況を調査した。表-1に弾性波探査の諸元を示す。

表-1 弾性波探査の諸元

起震方法	ハンマー打撃
データ取得方法	スタッキング法
受振点間隔	2～5m
受振器	固有周波:2Hz 型
解析ソフト	高精度屈折法地震探査

3. 弾性波探査の解析

弾性波探査の解析は、図-1に示す SIRT 法に基づくトモグラフィ法を適用した。トモグラフィ法の初期モデルは、走時曲線からハギトリ法で求めたハギトリ曲線の見掛け速度値を参考にした。セルサイズは、水平方向が受振点間隔の水平2～5m 以下、深度方向は地表から深度約10～30m の層厚を15区分に設定した。SIRT 法は、速度構造モデルを複数の四辺形（セル）に近似し、各セル内の速度を一定と仮定した上で、j 番目のセルのスローネスの修正量（ $\Delta S_j$ ）を、式-1で繰り返し修正しながら、実測値（走時）と整合する最適な速度モデルを推定する方法である。また、解析は走時曲線をハギトリ法で検討し、速度断面をトモグラフィ（的）法で求めた。このトモグラフィ法は、受振・起振点が地表だけでも、急崖地では立体的な測定になるため、適用性が高い。この利点を生かし、下記の2つの条件でそれぞれ行い、比較検討することで解

釈精度を向上させた。

- ① 解析1:深いほど速度増加すると仮定した一般的な方法
- ② 解析2:深いほど速度増加すると仮定しない方法(速度逆転層の有無を検討)

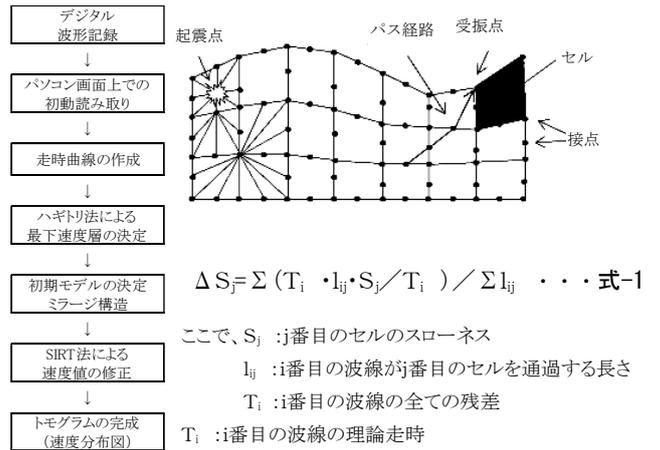


図-1 トモグラフィ法の解析手順

4. 緩み領域の推定

P波速度の全国的な統計資料の平均値を表-2に示す。弾性波探査および解析で得られた速度分布図を図-2に示す。

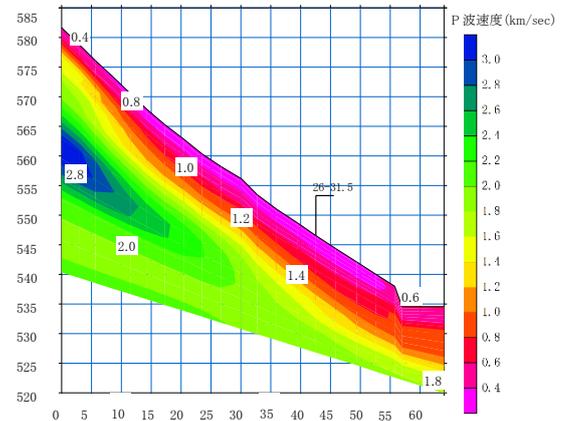


図-2 速度分布図

速度構造は、深いほど徐々に速度増加する速度漸移帯が尾根で厚く、谷で薄くなる風化帯のパターンや逆に低速度層が斜面下で厚くなる崩壊土砂等が反映された。深部の高速度層は、表-2に示す平均速度と比較し同等以下のため、風化岩～弱風化岩に相当する。露岩地で崖堆積物や空気（≒0.34km/s）まで速度低下した箇所は、浮石状で角礫状に剥離した箇所となっている。以上の解釈から、地山は下記のように大別され、緩み領域はP波速度0.4～1.4km/sと設定した。

- ① 約0.4～0.6km/s 以下：崩壊土砂、風化土～強風

化岩（遷急線直下で主な緩み部）

- ② 約0.6～1.4 km/s：強風化岩～風化岩または崩壊土砂の含水増加部
- ③ 約1.4～3.0km/s以上：風化岩～弱風化岩
- ④ 低速度帯や低速挟み層：割れ目帯や軟質層の挟み層（泥質部）

表-2 P波速度の統計的資料(全国平均)<sup>1)</sup>

岩石名		個数	平均値 km/sec	Max km/sec	Min km/sec
中生代堆積岩	砂岩類	33	4.18±0.24	5.31	2.70
	頁岩類	46	4.02±0.17	5.28	2.83
	互層類	167	3.93±0.09	5.26	2.26

### 5. ボーリング調査結果

図-3に速度分布図とボーリング柱状図の重ね合わせ図およびコア写真を示す。ボーリング調査結果の地層およびN値等を表-3に示す。層境界付近のP波速度について、「崩壊土砂」と「風化層」境界および「風化層」と「基盤層」境界のP波速度や各層厚は概ね整合している。また、各層厚が概ね整合していることから平均N値および平均RQDは、ボーリング調査結果と比較し大きな差はないといえる。よって、ボーリング調査結果と弾性波探査により想定された緩み領域は概ね整合している。

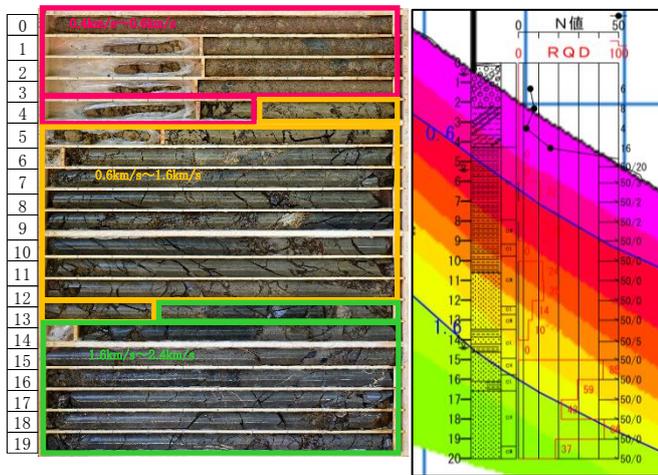


図-3 速度分布図と柱状図およびコア写真

表-3 ボーリング調査結果

	弾性波探査による想定	調査結果 (コア)	弾性波速度 (km/s)		平均N値	平均RQD
			弾性波探査による想定	調査結果	調査結果	調査結果
崩壊土砂		4.25	0.4～0.6	6		
風化層	12.02		0.6～1.4	254	11	
基盤層	20.00	20.00	1.4～3.0	300	62	

※N値の上限は300とした。

### 6. ボアホールカメラ観察結果

ボアホールカメラ解析によって得られる岩盤の緩み状態図を図-4に示す。図-4より、亀裂の開口幅についてGL-13m以浅は「0.5mm～2.5mm」であるが、GL-13m以深の開口幅は「0.5mm」が主体となっている。また、割れ目の頻度について、GL-13m以浅は1mあたり概ね20本以上の亀裂が見られたが、GL-13m以深では、GL-19m～20m区間を除けば、1mあたり概ね20本以下に減少する傾向が見られる。これらの深度は、弾性波探査により想定された「風化層」と「基盤層」の境界 (GL-12.02m) 付近に位置しており、弾性波探査で想定された緩み領域内では、亀裂の幅が大きく亀裂の頻度が高いことが分かった。以上より、ボアホールカメラ観察による岩盤の緩み状態と弾性波探査による想定された緩み領域は概ね整合している。

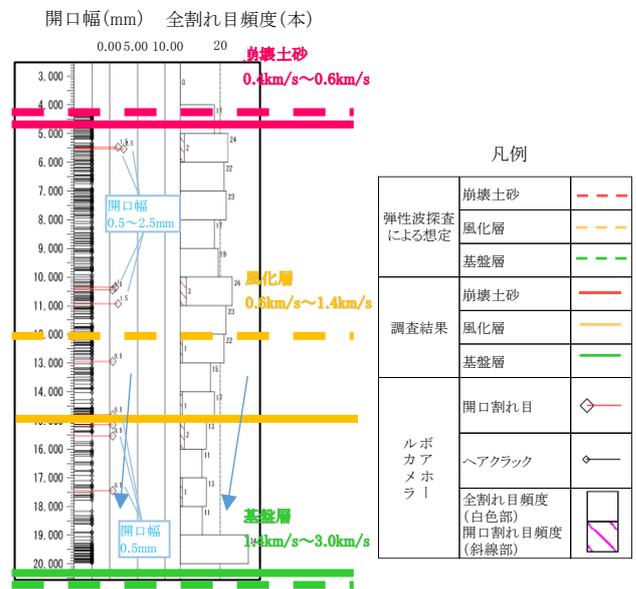


図-4 岩盤の緩み状態図

### 7. まとめ

岩盤斜面の緩み状況を把握するため、弾性波探査により斜面の緩み領域を推定した。推定した緩み領域に対して、ボーリング調査を実施し、想定された緩み領域とボーリングコア状況及びボアホールカメラの観察結果等の調査結果による緩み領域を比較した。弾性波探査で推定された岩盤斜面の緩み領域は、ボーリングコアの状況やボアホールカメラ解析結果と比較して、亀裂の頻度分布やN値等が概ね整合した。本業務では、弾性波探査による緩み領域の推定は有効であった。

#### 《引用・参考文献》

- 1) 服部保正、杉本卓司 (1975)：岩石のP波伝播速度に関する統計的研究 (I) (II)、物理探鉱第28巻第1号

# 埋没地形の推定における微動アレイ探査の活用事例

株式会社日さく ○鮎 沁, 石川 恵司, 塚田 佳人, 仲田 千佳子

## 1. はじめに

微動アレイ探査は、複数の地震計による同時観測（アレイ観測）により、風や海の波、車の振動など日常的な微動に含まれる表面波の位相速度を求め、さらにその分散曲線を逆解析することにより地盤のS波速度構造を推定する方法である<sup>1)</sup>。深部地盤構造のモデル化において有用性が広く認知されているが、近年では地表から数10m程度の浅部探査における活用も進んでいる。

本稿では、既往調査にて地層境界の不明確な埋没段丘の存在が確認され、かつ軟弱層厚の変化に富む河川周辺地域において微動アレイ探査を行い、探査結果とボーリング結果を統合して検討することで、埋没段丘の分布域境界や軟弱層厚の詳細な分布状況の推定を試みた事例について紹介する。

## 2. 調査方法

### (1)地盤状況

調査対象地である河川堤防は低地内の氾濫平野に位置し、南東方向には洪積台地の縁が迫っている（図-1）。



図-1 調査地付近の地質地盤図<sup>2)</sup>

当該地では、既往調査にて3本（下図①～③）、追加調査にて4本（下図④～⑦）、計7本のボーリングを実施し、うち既往調査にて実施した2本（①・②）において埋没段丘が確認されている（図-2）。

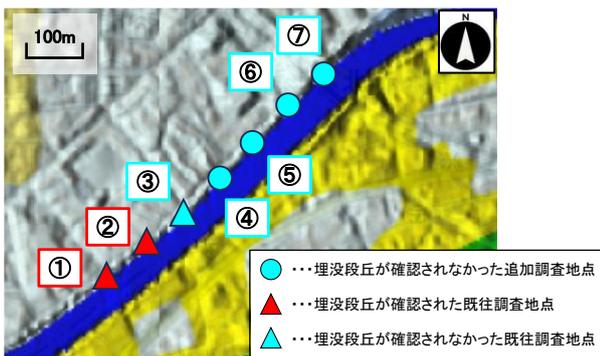


図-2 各ボーリング地点における埋没段丘の有無<sup>2)</sup>

### (2)探査方法と使用機材

探査測線は既往および追加調査の全ボーリング地点（①～⑦）を通るように河川堤防上に配置した（図-3）。

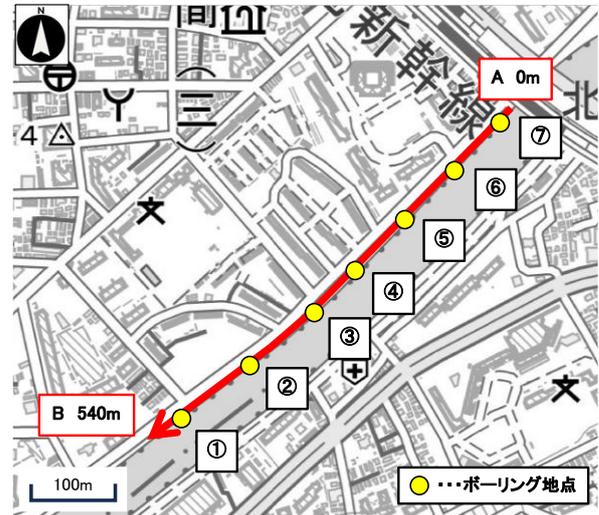


図-3 測線配置<sup>3)</sup>

地震計の配置にはリニア（直線）配置を採用し、10m間隔で設置した。地震計は9個使用しており、理論的な探査可能深度は45m（90m/2）程度である。

なお、微動アレイ探査装置は「McSEIS-AT（応用地質株式会社）」を使用した。

### 3. 探査結果およびボーリングデータとの総合解釈

微動アレイ探査によるS波速度構造と推定地質断面図を図-4に示し、比較検討を行った。

探査測線においては、軟弱な第1沖積層に対応したS波の低速度帯（桃色～赤色）、やや硬質な第2沖積層に対応した中速度帯（黄色～緑色）、および洪積層に対応した高速度帯（緑色～青色）に大きく区分される。

埋没段丘の存在が確認されたボーリングデータ①～②付近（測線の終点部付近）では、S波の高速度帯が①浅層部よりマウンド状に認められ、ボーリングデータ③に向かって高速度帯の分布が急激に深くなる傾向が読み取れる。また、沖積砂質土層が部分的に欠層となり、軟弱な沖積粘性土のみが厚く分布するボーリングデータ⑦付近では、低速度帯が深くなる傾向が読み取れる。

以上より、ボーリングデータから推定された埋没段丘や厚い軟弱層の分布と、微動アレイ探査によって得られたS波速度構造については、地層が概ね水平堆積しているボーリングデータ①や⑦付近では整合性が高いという結果が得られた。

一方、地層が大きく傾斜しているボーリングデータ③～⑤付近においては、傾斜の傾向は読みとれるものの、

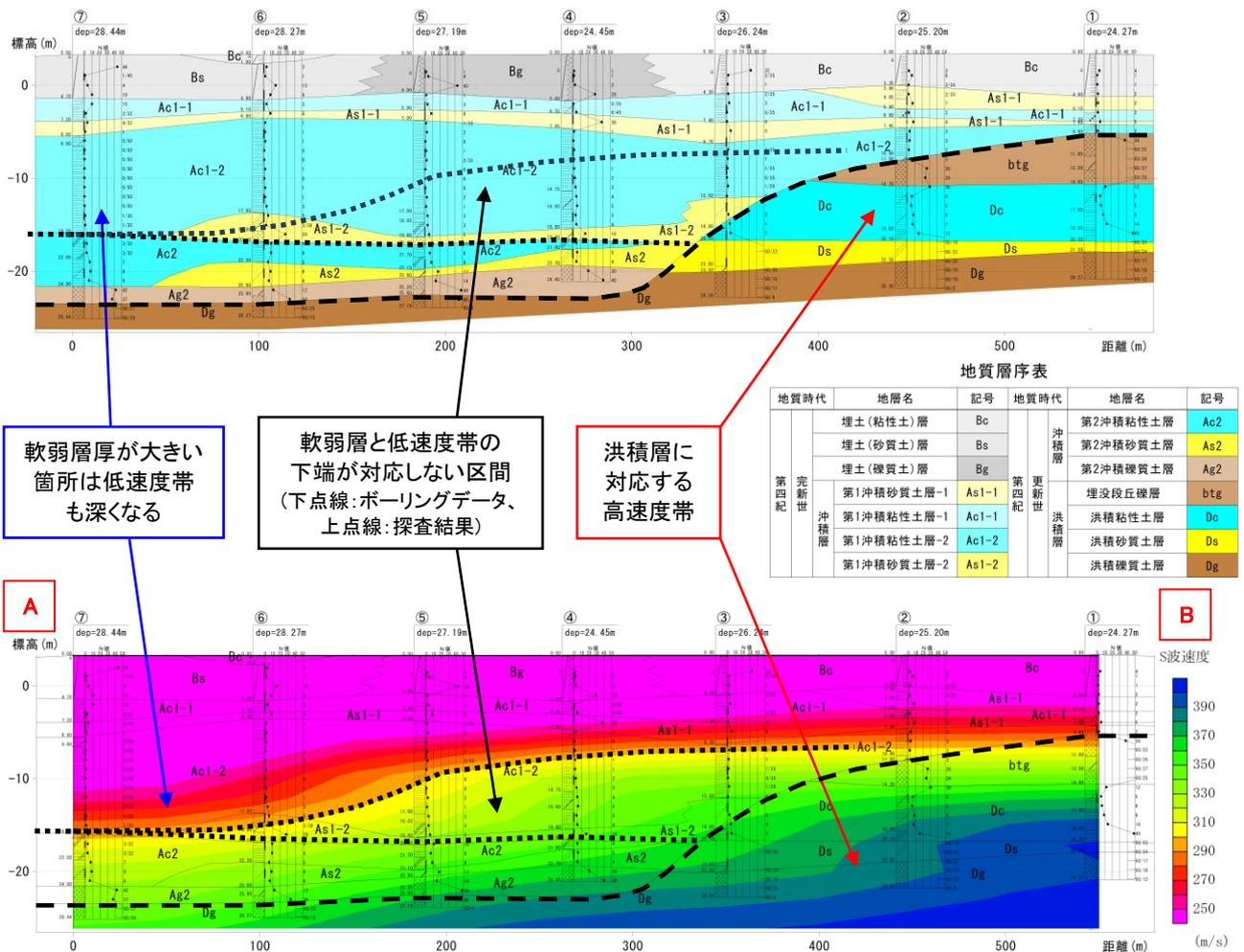


図-4 微動アレイ探査結果と推定地質断面図

軟弱な第1沖積層の下端と低速度帯(桃色～赤色)の下端深度は必ずしも一致しない。これは、地層が傾斜しているために第1沖積層・第2沖積層・洪積層の平均的な位相速度が解析に反映され、傾斜角が間延びしていると考えられる。このため、地層の傾斜が著しい箇所においては、地震計の間隔を狭めて配置する、解析条件を精査する等、改善の余地があると考えられる。

#### 4. まとめ

本調査で実施した微動アレイ探査では、測線に沿って連続的に沖積層に対応する低～中速度帯や洪積層に対応する高速度帯を検出しており、これらはボーリングデータとも概ね整合する傾向が認められた。しかしながら、地層が大きく傾斜する埋没段丘の分布域境界における軟弱層の下端部の把握については、地震計の配置間隔や解析条件にさらなる検討・改善を要する結果となった。

河川堤防のような線形構造物は、局所的な弱点箇所が全体の性能に影響するが、延長が長いことに加え、埋没地形の存在等、基礎地盤は不均質性を有することが多い。そのため、設計施工上問題となりうる箇所を抽出し、密なボーリング調査を実施する必要があるが、機械的に調

査間隔を狭めることは調査全体の費用や工期の増大につながる事となる。

一方、微動アレイ探査単体による地層状況の把握は評価が難しい面があるものの、既存資料の検討や現地踏査、ボーリングデータ等を統合して解釈することによって、埋没地形の概略を想定する上で有用なデータとなりうる。微動アレイ探査を含む物理探査手法の活用により、地質リスクの抽出や詳細な追加調査箇所選定の効率化に寄与すると考えられる。

#### 《引用・参考文献》

- 1) 池田達紀, 松岡俊文, 辻健, 林宏一 (2011) : SPAC法における異なる相関距離を考慮したマルチモード解析, 物理探査第64巻第2号, p. 127-138.
- 2) 産業技術総合研究所 都市域の地質地盤 (に加筆), (最終閲覧日 2024年5月28日). [https://gbank.gsj.jp/urbangeol/ja/map\\_tokyo/index.html](https://gbank.gsj.jp/urbangeol/ja/map_tokyo/index.html)
- 3) 国土地理院地形図 (に加筆), (最終閲覧日 2024年5月28日). <https://mapps.gsi.go.jp/maplibSearch.do#1>