

論文 Original Paper

表面波・弾性波・地中レーダ探査による小峰城石垣の
崩壊原因の分析橋本隆雄*¹, 斉藤 猛*²Analysis of collapse factors of stone wall of Komine Castle by
exploration of ground surface, elastic wave and
ground penetrating radarTakao Hashimoto*¹, Takeru Saito*²

Abstract: The Komine Castle is located in Shirakawa City in Fukushima Prefecture. Its stone walls collapsed at nine sites because of the Main shock of the 2011 Great East Japan Earthquake. In addition, deformation such as bulging occurred at six sites. Moreover, one more stone wall fell down because of the aftershock.

In particular, the damage on the south side of Honmaru (the main of a castle) was the most serious. Although it was restored as before, the reasons why it collapsed had not been revealed. In this study, three explorations were conducted in order to clarify the causes of the damage: (1) Surface wave exploration, (2) Elastic wave exploration, and (3) Ground penetrating radar.

Key words: earthquake, stone wall, collapse, castle, surface wave exploration, elastic wave exploration, ground penetrating radar

1. はじめに

福島県白河市にある小峰城の石垣は、2011年東北地方太平洋沖地震により震度6強の揺れを生じ、写真-1に示すように9箇所の石垣が崩落した。地震による石垣の崩落規模は、総延長約160m、面積約1,500㎡、個数約7,000である。特に、小峰城の入り口の清水門の背後の本丸南面の石垣は大きく崩壊した。東日本大震災における文化財被害としては、最大規模となった。また、石垣の6箇所は、崩落は免れたものの、全体的に孕みや目地の開きなどの変形が生じた。その1ヶ月後の4月11日には、再び震度5強の余震が発生し、新たに東側丘陵部の石垣1箇所が崩落した。東日本大震災における文化財被害としては、最大規模の被害であった。さらに、復元建物である三重櫓や前御門についても、漆喰壁や瓦の落下、柱材の亀裂や歪みなどの被害を受けた^{1), 2)}。

この修復作業は、石垣16箇所、三重櫓・前御門を対象に、2011年12月より文化財災害復旧事業として開始された。



写真-1 東日本大震災で崩落した小峰城跡の石垣

これまで本丸南面の石垣は、昭和57年にも大雨によって本丸南面石垣の東隅から桜門の間の桜門よりの三分の一ほどが崩壊した³⁾。今回はより大規模に東隅から桜門脇まで崩れた。2011年の東日本大震災で損壊した福島県白河市の小峰城で石垣の修復が完了した。この工事は、約1万個の石を一つ一つ積み上げる緻密な作業で、約50億円がかかった。特に、小峰城の入り口の清水門の背後の本丸南面の石垣は大きく崩壊した。しかし、地震で崩壊した原因が明らかでない地震前の形状に復旧が

*¹ 国士舘大学理工学部 まちづくり学系 教授*² 株式会社ジオフィール 会長

行われ、耐震性能を考慮したものとなっていない。そこで、この被害原因を明らかにする^{4)~7)}ために、①表面波探査、②弾性波探査、③地中レーダの3つの探査^{8)~10)}を行った。

2. 探査の内容

(1) 探査の期間

平成29年3月1日～平成29年10月30日

(2) 探査の場所

福島県白河市小峰城内

(3) 探査の目的

石垣裏地盤調査

(4) 探査数量

探査は、以下のように①表面波探査(6測線, 228m, 1mピッチ)、②弾性波探査(4測線, 156.2m, 1mピッチ)、③地中レーダ(5測線, 167.8m)を行った。

1) 表面波探査(6測線, 228m, 1mピッチ)

SV-1測線	47m
SV-2測線	47m
SV-3測線	45m
SV-4測線	45m
SV-5測線	21m
SV-6測線	23m

2) 弾性波探査(4測線, 156.2m, 1mピッチ)

D-1測線	44m
D-2測線	44m
D-3測線	33.8m
D-4測線	34.4m

3) 地中レーダ(5測線, 167.8m)

R-1測線	43m
R-2測線	45.5m
R-3測線	27.2m
R-4測線	27.6m
R-5測線	24.5m

3. 表面波探査の方法

(1) 原理と特性

表面波探査はレイリー波探査とも称され、浅部地質調査法として有効な手法である。地表において鉛直方向に振動を与えると、地中に伝播する3種類の弾性波動が生じる。弾性波が媒質定数(弾性定数または速度、密度)の異なる媒質との境界面に到達すると反射・屈折の現象を生じ同時に境界波を発生する。境界波のうち、特に自由表面に沿って伝播する波動を表面波と呼んでいる。

表面波は、波動伝播方向と振動方向(質点運動の軌跡)、伝播速度、鉛直方向の振幅分布などの違いによっ

てさらに2種類に区分される。これらは発見者の名前を記念して、それぞれレイリー波、ラブ波と呼ばれている。地中の層状媒質に沿って表面波が伝わる際には、伝播速度が周期あるいは波長の関数として統計的に変化する分散という特有の現象を示す。この分散は、地震記録を複雑にする反面、表面波の記録解析を通じて弾性波速度構造を詳しく推定することができる。

(2) 測定方法

測定は、図-1に示すように等間隔に受振器(12~24個)を設置し、ハンマー等により発生された振動を記録する。震源は通常、地表面をハンマー打撃する方法が使われ、通常深度30m程度までの探査が可能である。深く調査する場合には、重量錘体(標準貫入試験のモンケンなど)を自由落下させる。また、スタッキングによりランダムノイズを軽減し、信号を強調することによってS/N比を向上させる。得られた記録の中には表面波だけでなく、直接波、屈折波、反射波、音波も含まれるが、表面波の振幅は他の波より大きいため抽出し易く、表面波がもたらす地下構造の情報は他の波よりも多い。人工震源により放射される波動エネルギーの約70%は表面波として伝搬することが弾性波動論から導かれている。

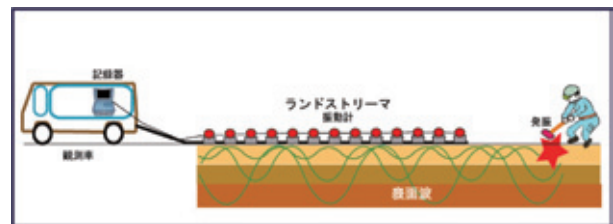


図-1 表面波探査模式図

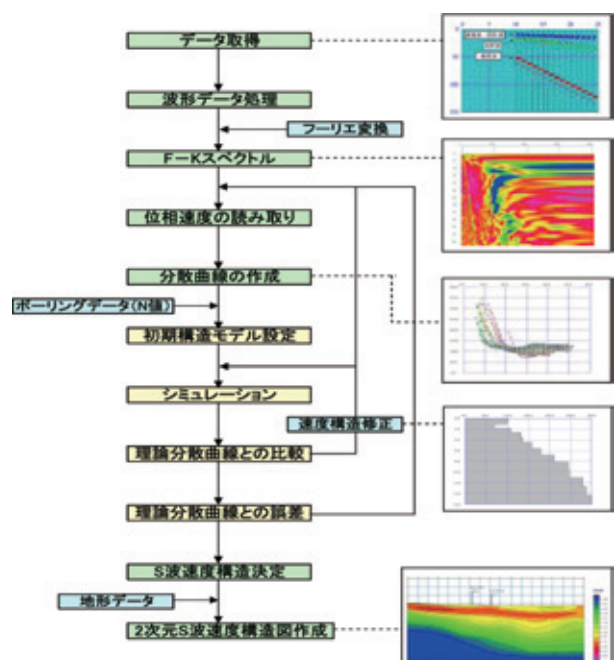


図-2 表面探査解析フロー

(3) 解析方法

図-2は表面探査のフローである。表面波探査の解析の流れ、表面波の分散性を求めるアルゴリズムはF-K法によっている。図-3に記録波形、図-4にF-Kスペクトルを示す。表面波はいろいろな周波数からなり、周波数によって位相速度が異なる分散性という性質をもっているが、分散性の定量化はF-Kスペクトルから導かれる分散曲線(図-5)によって表現する。深度zは周波数fの波の波長をλとして $z = \lambda / 2$ で換算する(λ=位相速度Vr/f)。

これは「ある周波数の位相速度にもっとも大きな影響を及ぼす地層境界の深度は、その表面波の半波長にほぼ整合する」という一般原理にもとづいている。

構造解析の手順は、まず分散曲線の変曲点付近に地層境界を設定する。次に、位相速度の値を参照して仮定したS波速度を各層へ代入し、その構造モデルにおける理論分散曲線を計算する。

両曲線のフィッティングの吟味を行い、S波速度や層数、層厚を適宜変更しつつ計算し、画面表示されるFitness係数が1.00に近くなるまで計算を繰り返し、最終構造解を絞り込む。最小二乗法による自動解析も可能である。

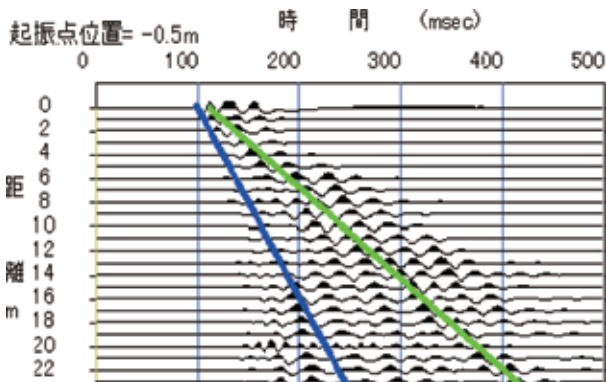


図-3 記録波形の例

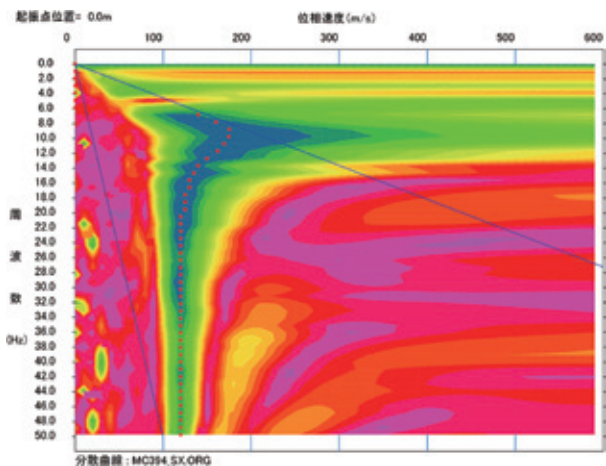


図-4 F-K スペクトルの例

実体波のP波を扱う屈折法探査では挟在する低速度逆転層をとらえることはできない。表面波は低速度層の存在をも忠実に反映した分散性をもって観測され、表面波探査はこの分散性をもとに地下構造を解析する方法なので、低速度層を容易に検出することができる。

また、受振器を少しずつずらして測定することにより二次元的に表示することもできる(図-6)。

(5) 使用機器

表面波探査に用いた使用機器を写真-2に示す。その使用機器の仕様(主要部分)は、以下のようになる。

- ① 型名 McSEIS-SX 48
- ② 入力チャンネル数 1,2,3,12,24,48
- ③ サンプル数 512,1024,2048,4096,8192
- ④ サンプル間隔 25μs~2ms (7段階)
- ⑤ 増幅方式 瞬時浮動小数テン増幅(ダイナミックレンジ120dB)
- ⑥ A/D変換・信号増幅 18ビット/10ビット
- ⑦ アナログフィルター ハイパスフィルター(タイプ1,タイプ2),ローパスフィルター:なし
- ⑧ 周波数帯域 4Hz~4000Hz
- ⑨ CPU i486
- ⑩ ハードディスク 1.2GB 最大256ファイル収録
- ⑪ プリトリガ 0(OFF) 128ワード(ON)

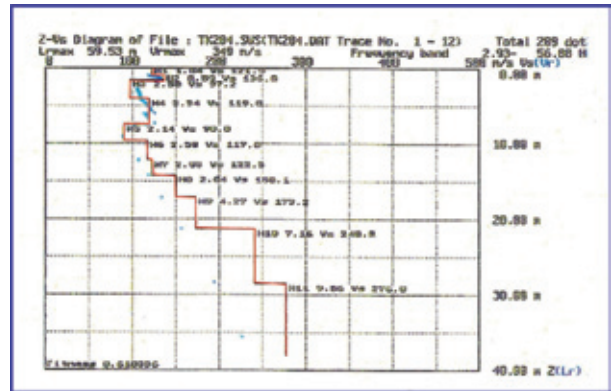


図-5 S波速度構造解析図

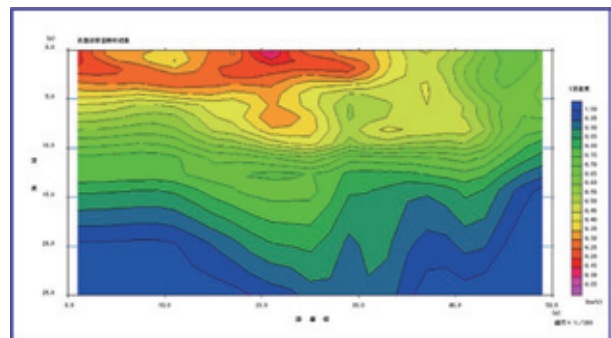


図-6 S波速度構造二次元断面図

- | | |
|------------|--|
| ⑫ トリガレベル | 100～1000mV, OFF |
| ⑬ モニター | TFTカラー液晶(640×480ドット) 10.4インチ |
| ⑭ インターフェース | パラレルポート×1
外部キーボード接続用ポート×1 |
| ⑮ 電源・重量・寸法 | 直流12V(消費電力35W)／約9kg／約330mm×280mm×260mm |
| ⑯ 動作環境 | -5℃～45℃ 気温40℃±2℃ |
| ⑰ 受振器 | HGS SM-11固有周波数4.5Hz |
| ⑱ 解析ソフト | SeisImagerSW, GFSEIS |

4. 弾性波探査(スタッキング法)の方法

(1) 原理と特性

弾性波探査は、土質や地質・岩質の特性に応じて異なる、地震波の伝播速度の違いを利用して、地下構造を推定する方法であり、解析で得られる地山速度値(V_p)は、各種設計において、地山評価の指標とされるものである。

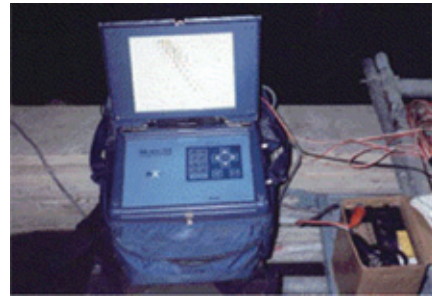
(2) 測定方法

調査方法としては、一般に爆薬を爆発させて人工地震を起こし、その記録から地下構造を推定する方法がとられているが、爆薬が使用できない場合や探査深度が浅い場合には人力によるハンマリングや重錘落下により起振する。その場合、通常起振エネルギーが弱いため数回の起振記録波形を加算し(スタッキング法)信号の増幅を行う。今回の調査では起振はハンマリングとしスタッキング法を用いる。弾性波探査の実際の作業は、図-7及び写真-3に示すように、一定の間隔に地震計を設置し、測線の両端や中間に設けた起振点でハンマリングにより起振させる。発破点から、各地震計に到達する地震波を電気信号に変換して、中継ケーブルにより観測本部の増幅器に送る。増幅器により増幅されたアナログデータをデジタルデータに変換しハードディスク・MO等に保存する。波形モニターにより波形記録の良否を判定し不良の場合は再測定を行う。

(3) 解析方法

- 1) データ整理は、受振点および起振点の位置と起振点の深度などについて行う。
- 2) 走時曲線の作成は解析の基本であるから、読み違いやプロット間違いがないように、十分なチェックと調整を行う。作成された走時曲線は、必要な精度以内で、
 - ① 往復走時の一致、
 - ② 原点走時の一致、
 - ③ 走時曲線の平行性

などの条件を満たすようにする。なお、走時曲線は、横軸に距離、縦軸に走時をとって、各観測点に点を打ち、



(a) 記録器



(b) 測定状況

写真-2 表面波探査測定状況

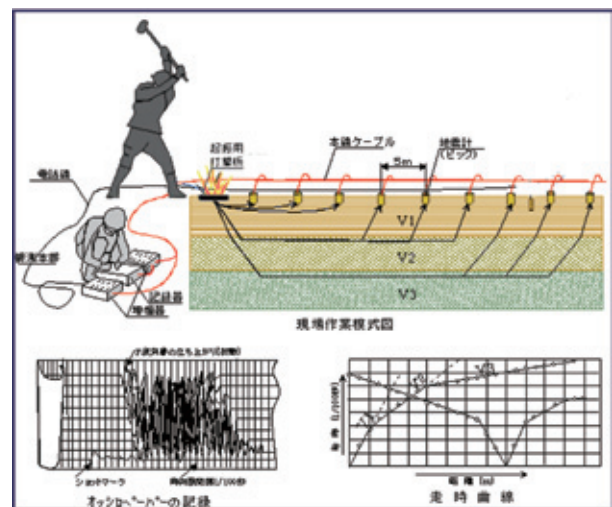


図-7 弾性波探査表面波探査模式図



写真-3 弾性波探査測定状況

滑らかな曲線でつないだもので地下構造を解析する手段として用いるものである。

3) 走時曲線の識別を行い、適切に調整された走時曲線から、所定の解析法を用いて手順に沿った解析を行って、測線下の速度層解析断面を作成する。

4) 解析は一般に「萩原の方法」とその拡張法で行う。

実際の観測では、地形や地質が複雑なため、走時曲線は直線とはならずかなり凸凹を呈し、走時曲線の傾きから速度を求めたり、走時曲線の折れ曲がり点を見出すのが難しいことが多い。このような場合でも比較的容易に解析できる方法として「萩原の方法」(はぎとり法)がある。この方法では、往復観測によって得られた一対の走時曲線の屈折波によって描かれた部分を組み合わせ、簡単な計算によってはぎ取り走時曲線を描く。

これは地表で起振した波を図-8に示すように、第2速度層の表面に並べた受信器によって観測した場合の走時曲線に相当し、その傾きから第2速度層の速度を求めることができる。さらに各受振点における第2速度層の深度も計算によって求められる。3層以上の構造に対しても「はぎとり法」を拡張して適用することができる。

「はぎとり法」は地下の速度層の凹凸が激しい場合には正しい解析結果を与えないことがある。このような場合には解析で得られた速度層断面図上にスネルの法則に基づいた波の経路を作図し、その経路に沿った走時を計算(パス計算)で求める。このパス計算による走時と観測された走時を比べ両者が一致するように断面図を修正することによって解析精度を上げる。

高精度屈折法探査は、多チャンネルのデジタルデータを取得し、コンピュータを使用してパス計算と速度構造モデル修正の反復処理によるトモグラフィー解析(有限要素法)を行い地盤の弾性波速度構造を精度良く解析する方法である。解析結果は、図-9に示すようにカラー断面に速度分布を表示する。

5. 地中レーダ探査の方法

(1) 原理と特性

本装置の原理は、現在広く用いられている一般のレーダと、基本的には全く同じである。すなわち、アンテナから地下に向けて発射された電磁波は、伝搬媒体となる土や地層と電気的性質の異なる物質、例えば図-10に示すように埋設管、空洞、地下水などの反射物体、または地層の境界面で反射される。

その反射波が、再び地層に出て受信アンテナに到達するとき、その往復時間から反射物体までの距離を計算できる。さらにアンテナを移動測定することにより、反射物体の水平位置を知ることができる。

本装置は、写真-4に示すように石垣の築石や裏込め栗石の構造を高い分解能で探査することを目的とするため、パルス幅のきわめて短い数ns (ns (ナノセカンド))

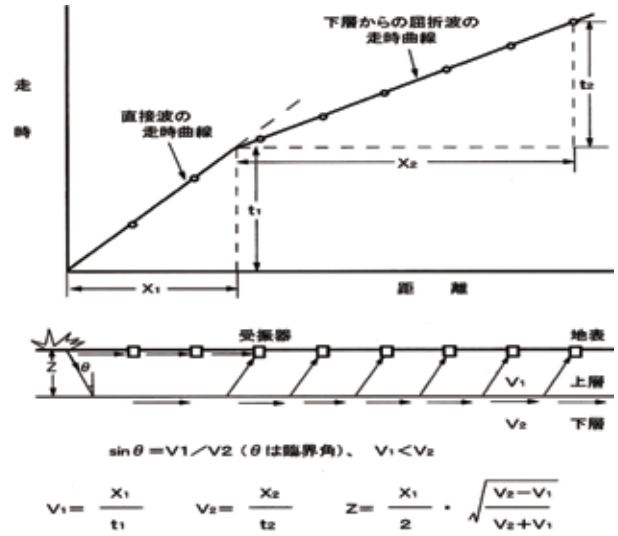


図-8 水平2層構造の走時曲線

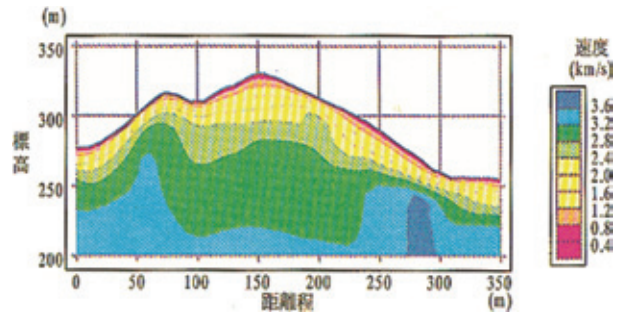


図-9 速度分布

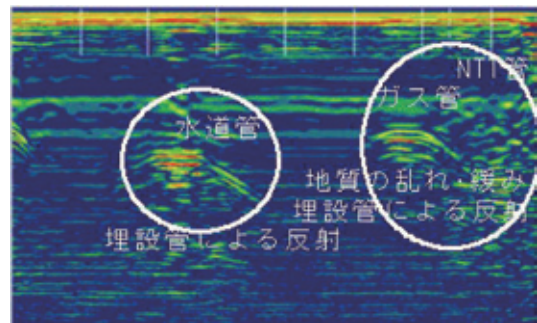


図-10 レーダ探査映像



写真-4 地中レーダ探査測定状況

=10億分の1秒)パルスの受信波が必要とされる。通常、遠距離用のレーダの送信波は、搬送波(連続波)のオン/オフによる数nsのバースト波を利用しているが、搬送波の中心周波数が1GHz以上のマイクロ波となり、地表面での反射や地表での減衰が大きくなる。そのため本装置は搬送波を含まないインパルス波を送信に用いている。数nsのインパルス波はDC~数百MHzまでの周波数成分が分布するので、本装置のアンテナは特殊な広帯域アンテナを使用している。大地の比誘電率を $\epsilon\gamma$ とすると空気中の電磁波の伝搬速度が 3×10^8 m/sなので、地中における電磁波の速度Vは、

$$V = \frac{3 \times 10^8}{\sqrt{\epsilon\gamma}} \quad (\text{m/s}) \quad \text{--- 式 (1)}$$

で求められる。

反射物体までの距離Dは、送信時刻と反射波の受信時刻の時間差Tから、

$$D = \frac{1}{2} V \cdot T \quad (\text{m}) \quad \text{--- 式 (2)}$$

の式で求めることができる。

電磁波の反射は地中の媒質と電気的性質の異なる境界面で起こるので、金属のみならず、塩ビ管などの非金属や空洞等の探査も可能となる。測定結果は地中の垂直断面図の形の画的な情報として得られるので、地中の様子を総合的に知ることができる。なお、参考までに各種物質の概ねの比誘電率を表-1に示す。

(2) 適用条件

地中レーダ探査が適用可能、または困難な条件は、表-2のとおりである。土壌地盤の場合は均質な土または砂である必要がある。適用困難な条件は、以下のとおりである。

- ① 土質が海砂の場合や特殊な土で、電磁波の距離減衰が著しく大きい場合
- ② 碎石を含めての舗装の厚さが1m程度以上の場合
- ③ 地下水位より深いところに探査対象物がある場合
- ④ 探査対象物の手前に鉄筋等が密にある場合
- ⑤ 電気的ノイズの多いところ

(3) データ処理

現場で収録したデータには、アンテナ・地表面間の多重反射波、礫や埋設物からの回折波、地質構造の凹凸による回折波等、解釈するのに不必要なノイズが含まれる。これらを必要に応じて除去し、最適な構造解釈が可能な断面を作成するためにデータ処理を実施する。

データ処理の主なメニューは、次のとおりである。

- ① データの入力、出力、転送
- ② 各種フィルター処理(バンドパスフィルター、2次元速度フィルター)
- ③ 多重反射除去フィルター(デコンボリューションフィルター)
- ④ マイグレーション(回折波の2次元移動)
- ⑤ 振幅調整
- ⑥ カラー表示処理(16段階)、濃淡表示

2) 深度

- a) 誘電率を設定して、深度スケールを表示させる。あるいは既知の深度の埋設物がある場合は、その深度に誘電率を合わせ込む方法もある。
- b) 埋設物が比較的小口径の管類($\phi 100$ mm程度以下)で、画像のS/Nが良い(明らかに埋設物があると判断できる)場合、以下に示すごとく土の電気的性質(誘電率など)を知ることなしに、数式を用いて埋設物の深度を求めることができる。

図-11に示すようにのように、アンテナを埋設物の真

表-1 各種物質の比誘電率と伝播速度

物質	比誘電率($\epsilon\gamma$)	速度	m当たりの換算時間(ns)
空気	1	3×10^8	7
淡水	81	3.3×10^7	61
海水	81~88	$3.2\sim 3.3\times 10^7$	61~63
淡水氷	4	1.5×10^8	13
海水氷	4~8	$1.1\sim 1.5\times 10^8$	13~19
乾燥した砂	4~6	$1.2\sim 1.5\times 10^8$	13~16
淡水飽和砂	30	5.5×10^7	37
淡水飽和シルト	10	9.5×10^7	21
淡水飽和粘土	8~12	$8.7\sim 11\times 10^7$	19~23
ローム	30~36	$5\sim 5.5\times 10^7$	37~40
平均的表土	16	7.5×10^7	27
花崗岩	5~8	$1.1\sim 1.3\times 10^8$	15~19
石灰岩	7	1.1×10^8	18
コンクリート	5~10	$9.5\sim 13\times 10^7$	15~21
アスファルト	2.7	1.8×10^8	11

表-2 適用可能条件

アンテナ周波数(MHz)	探査深度(m)	使用目的
1000	0.2~0.3	構造物の配筋、亀裂
900	0.3~0.5	トンネル背面の空洞、構造物の配筋、亀裂
500	1.5~2	トンネル背面の空洞、舗装厚、埋設管、遺跡、礫分布
300	3~5	埋設物、地下空洞、地下水、遺跡、廃棄物、地質構造
100	5~10	地下水、地質構造、地下空洞

上に置いた時と、そこからアンテナをL (m) 移動した時を考える。埋設物の真上での電磁波の往復時間を t_0 、L (m) 離れたときの電磁波の往復時間を t_1 としたとき、 t_0 、 t_1 は、

$$t_0 = \frac{2 D_0}{V} \quad \text{--- (1)}$$

$$t_1 = \frac{2 D_1}{V} \quad \text{--- (2)}$$

で求まる。ここで、Vは地中での電磁波の速度を示す。また、ピタゴラスの定理より

$$D_0^2 + L^2 = D_1^2 \quad \text{--- (3)}$$

と言える。(1)、(2) より、

$$D_1 = \frac{D_0 + t_1}{t_0} \quad \text{--- (4)}$$

(4) を (3) に代入すると、

$$D_0^2 + L^2 = \left(\frac{D_0 + t_1}{t_0} \right)^2 \quad \text{--- (5)}$$

$$D_0^2 = \frac{L^2}{\left(\frac{t_1}{t_0} \right)^2 - 1} \quad \text{--- (6)}$$

よって、

$$D_0 = \frac{L}{\sqrt{\left(\frac{t_1}{t_0} \right)^2 - 1}} \quad \text{--- (7)}$$

が求まる。つまりCRT画面上よりL、 t_0 、 t_1 を読みとり、埋設物の深さ D_0 を求めることができる(図-12参照)。また、データ処理におけるマイグレーションの入力速度は、この方式により算出するもので、今回はこの値から深度軸を決定することにする。

(5) レーダ映像の大まかな識別法

レーダ映像図から埋設物等の種類を判別する際、以下の特徴を大まかな目安として推定する(図-12参照)。

- a) 地表近くで横方向に連続した縞模様は地表面での反射
- b) 地中内部で横方向連続した縞模様は地層の境界での反射
- c) 部分的に反射が強い所は、埋設物が存在する可能性

- があり、その波形が放物線上の場合は、球状物体(埋設管類、球状の空洞)の反射
- d) 平板状の反射が深さ方向に続いている場合は、平板状の空洞、玉石または埋設物による反射

6. 各地盤探査の結果

この被害原因を明らかにするために、3つの地盤探査を行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

(1) 表面波探査

表面波探査は、図-14及び図-15に示すように地表面付近の約10m付近の地盤状況を把握するために、石垣と平行に6測線、総延長228m、1mピッチで行った。表面波探査では、本丸側に向かって谷を埋めた盛土であることが明らかとなった。

(2) 弾性波探査

弾性波探査は、図-16及び図-17に示すように地表面から約20mの深い部分までの地盤状況を把握するために、石垣と直角方向に4測線、総延長156.2m、1mピッチで行った。弾性波探査では、崩壊した本丸南面石垣に

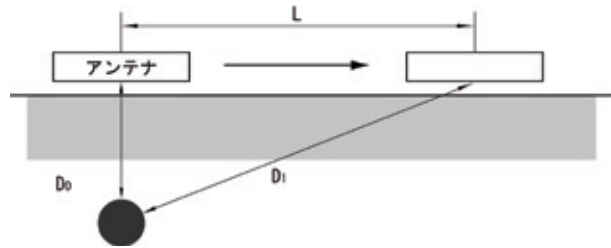


図-11 深度の概念

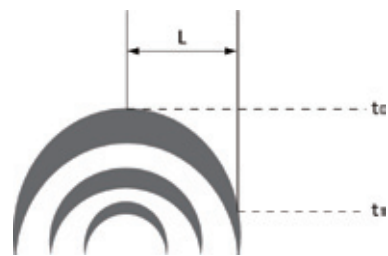
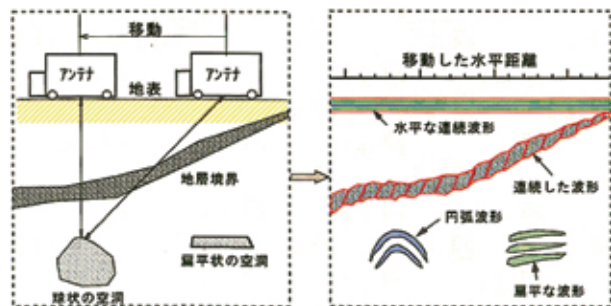
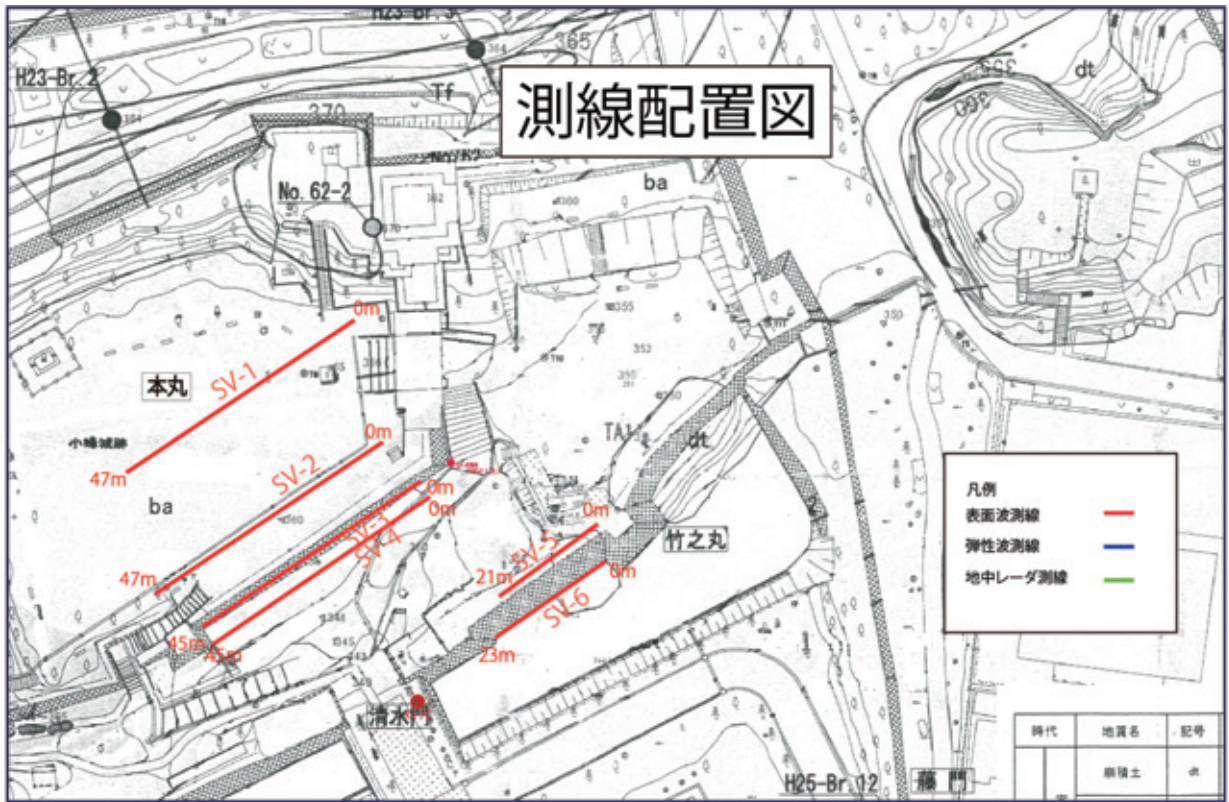


図-12 画面上での読み取り



(a) 測定時の地下断面 (b) レーダ断面パターン

図-13 埋設物と映像パターン



(a) 表面波探査測線配置図

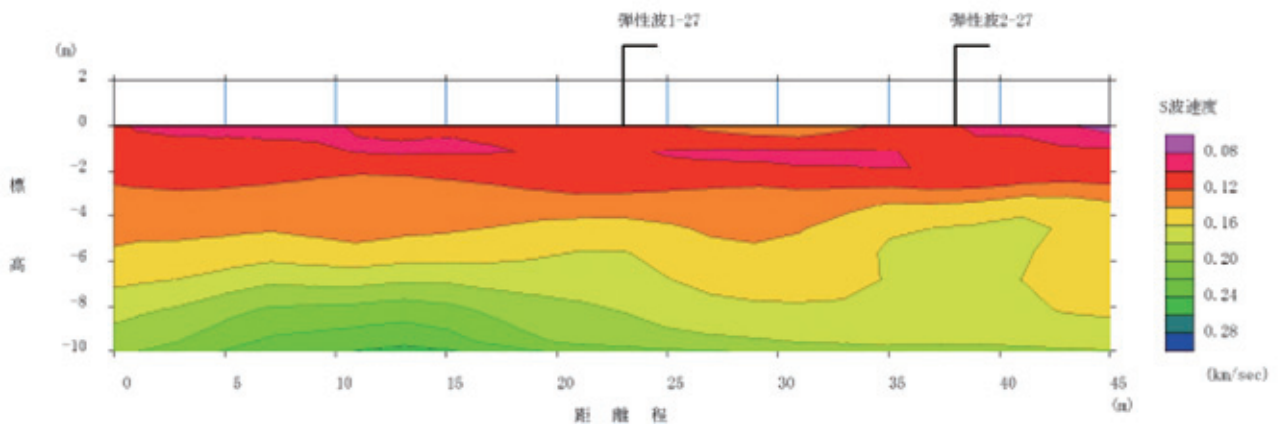
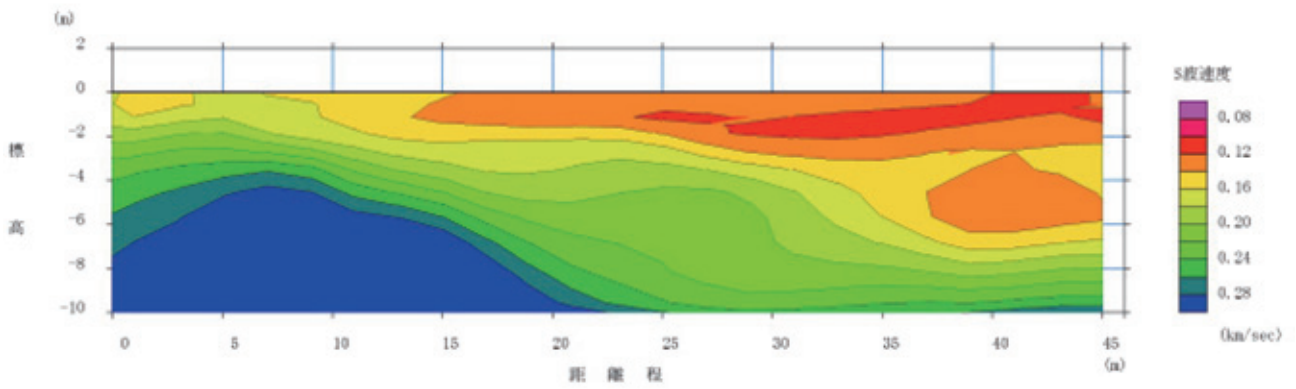
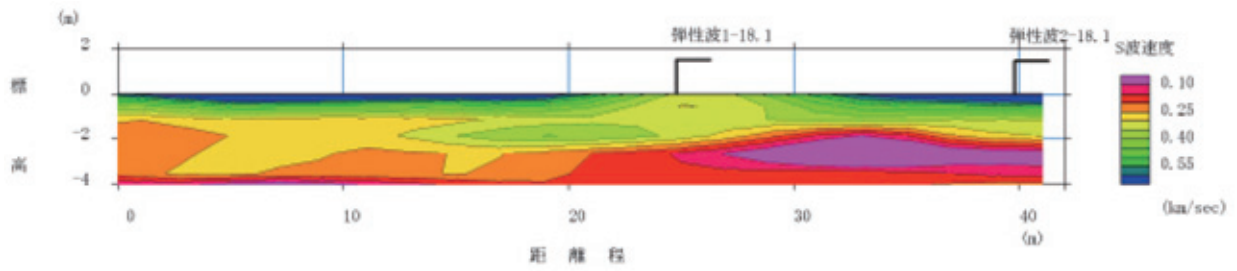
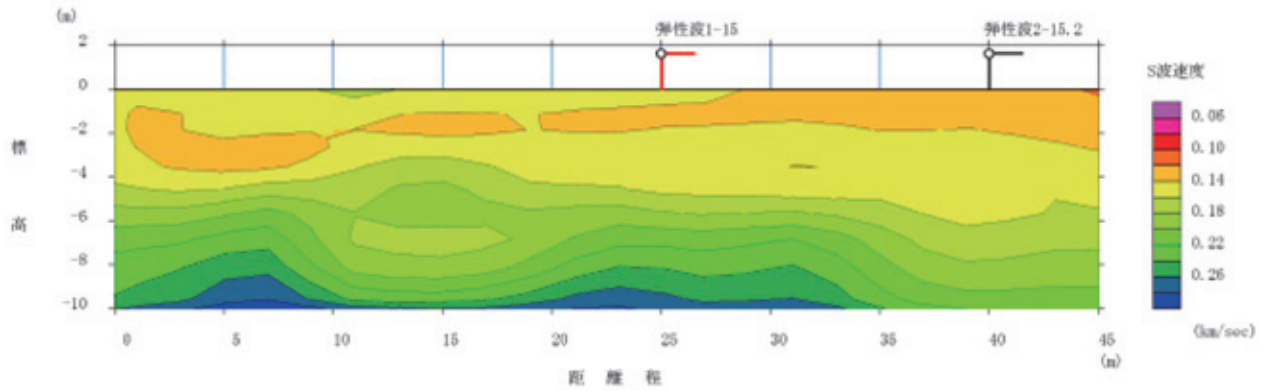


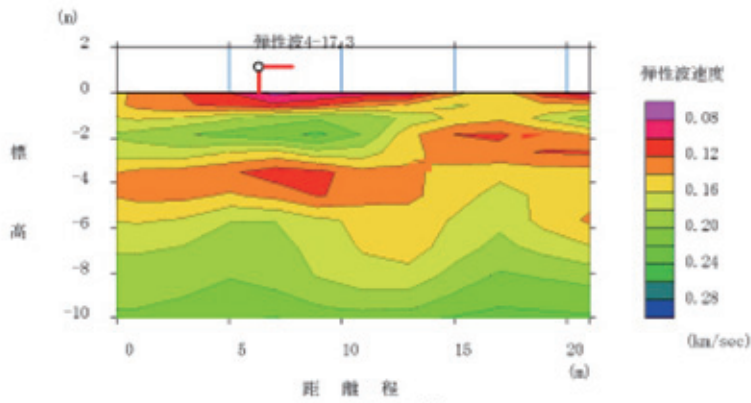
図-14 各側線の表面波探査結果 (その1)



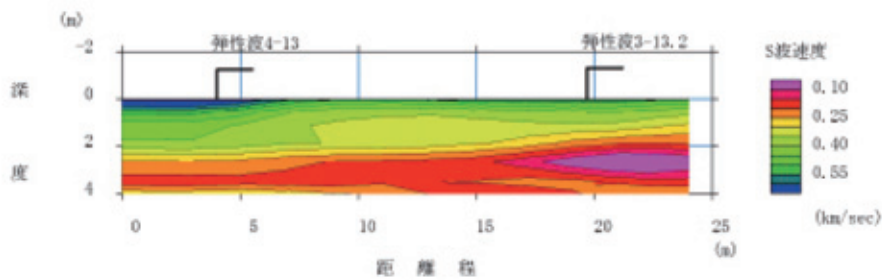
(d) SV-3測線



(e) SV-4測線

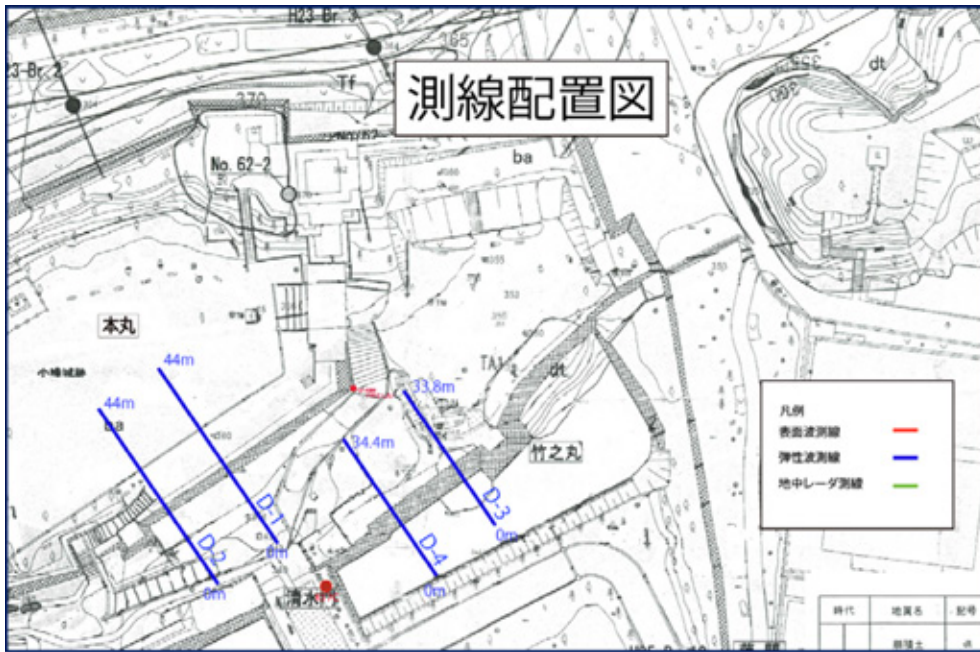


(f) SV-5測線

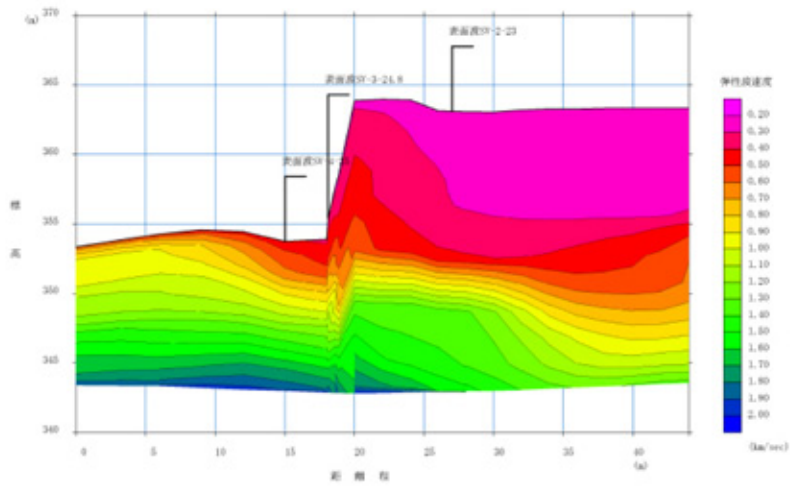


(g) SV-6測線

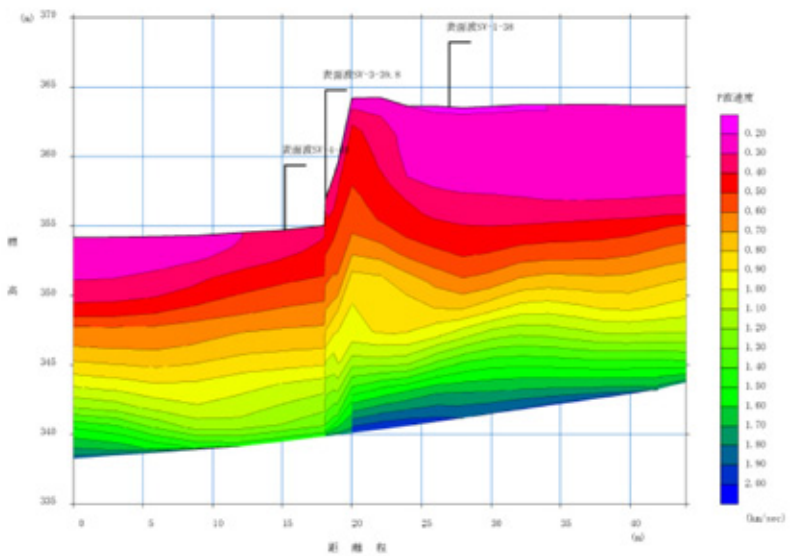
図-15 各側線の表面波探査結果 (その2)



(a) 弾性波探査測線配置図

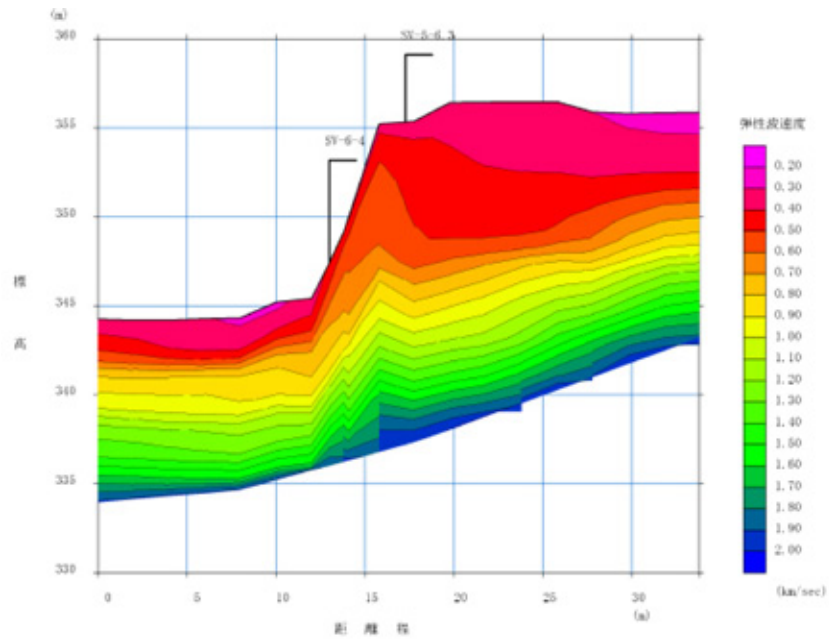


(b) D-1測線

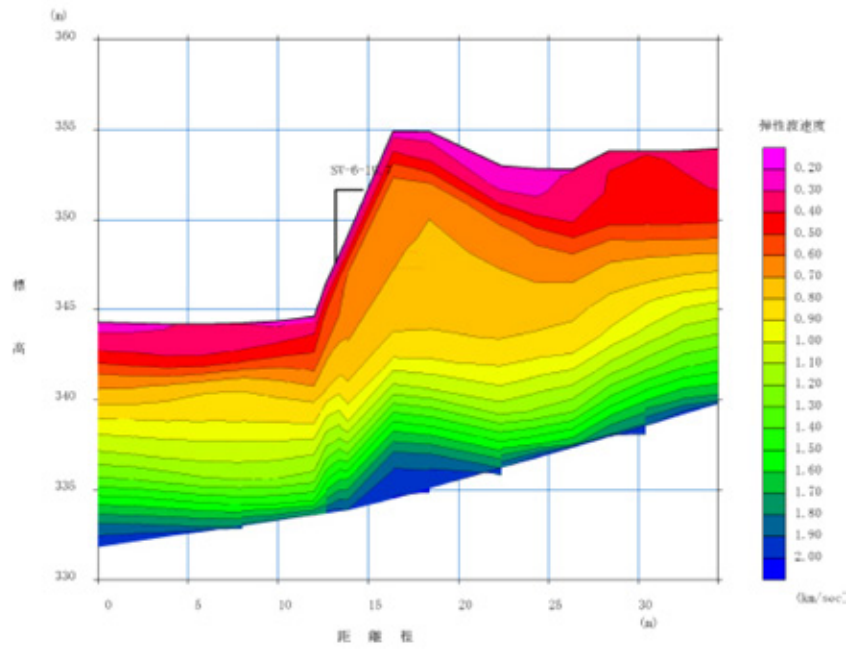


(c) D-2測線

図-16 各側線の弾性波探査結果 (その1)



(d) D-3測線



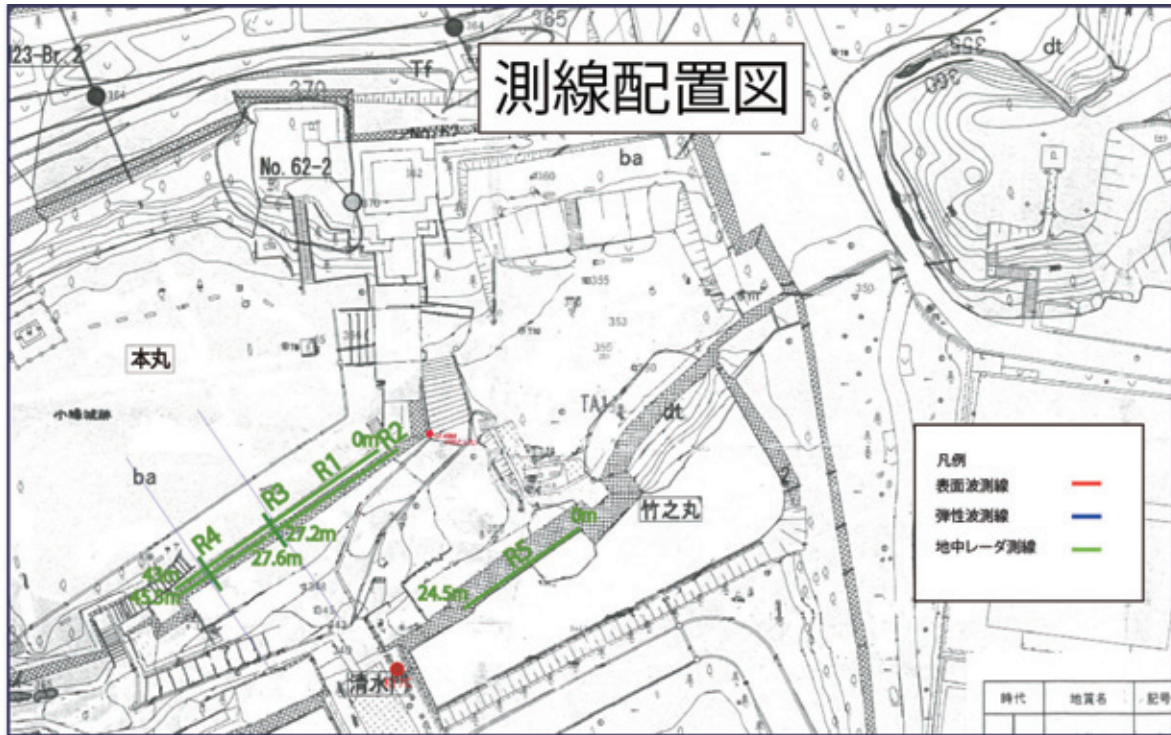
(e) D-4測線

図-17 各側線の弾性波探査結果 (その2)

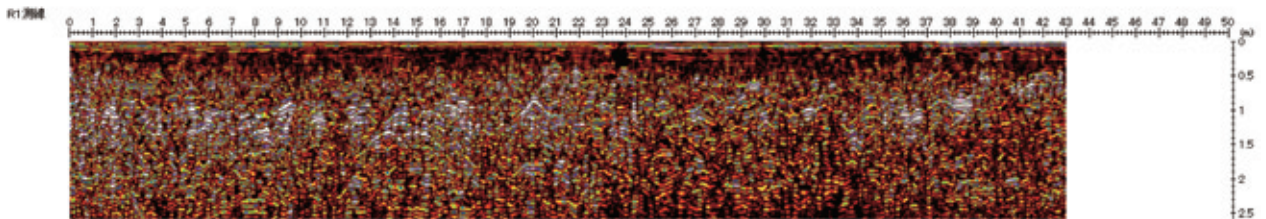
向かって深い谷を埋めた盛土であることが明らかとなった。特に本丸南面石垣は、昭和57年の大雨によって崩壊した箇所側の方が深い谷であることが分かった。

(3) 地中レーダ探査

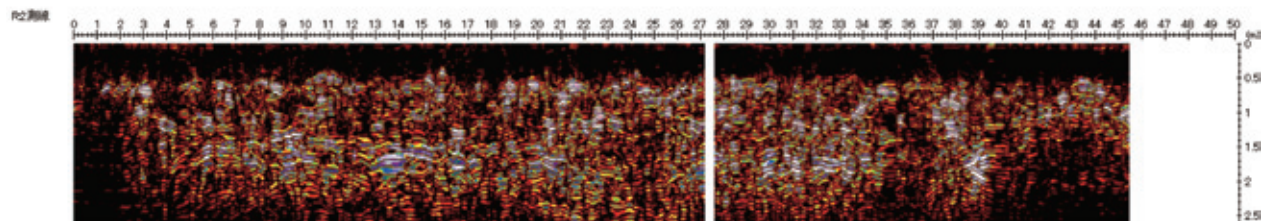
地中レーダは、図-18及び図-19に示すように石垣の構造を把握するために、石垣の縦断方向に5測線、総延長167.8mで行った。地中レーダでは、石垣の構造を十分に把握することができることが明らかとなった。



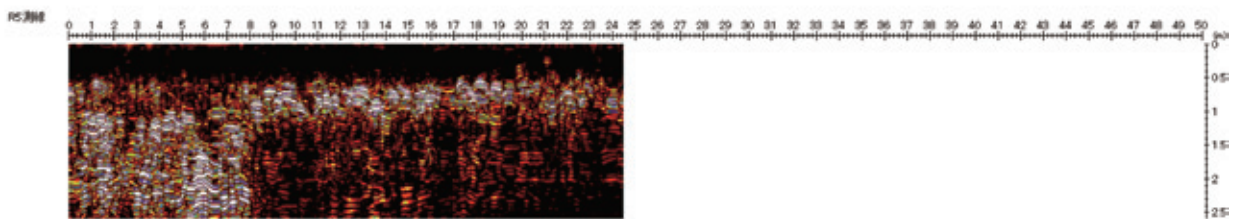
(a) 地中レーダ探査測線配置図



(b) R1測線

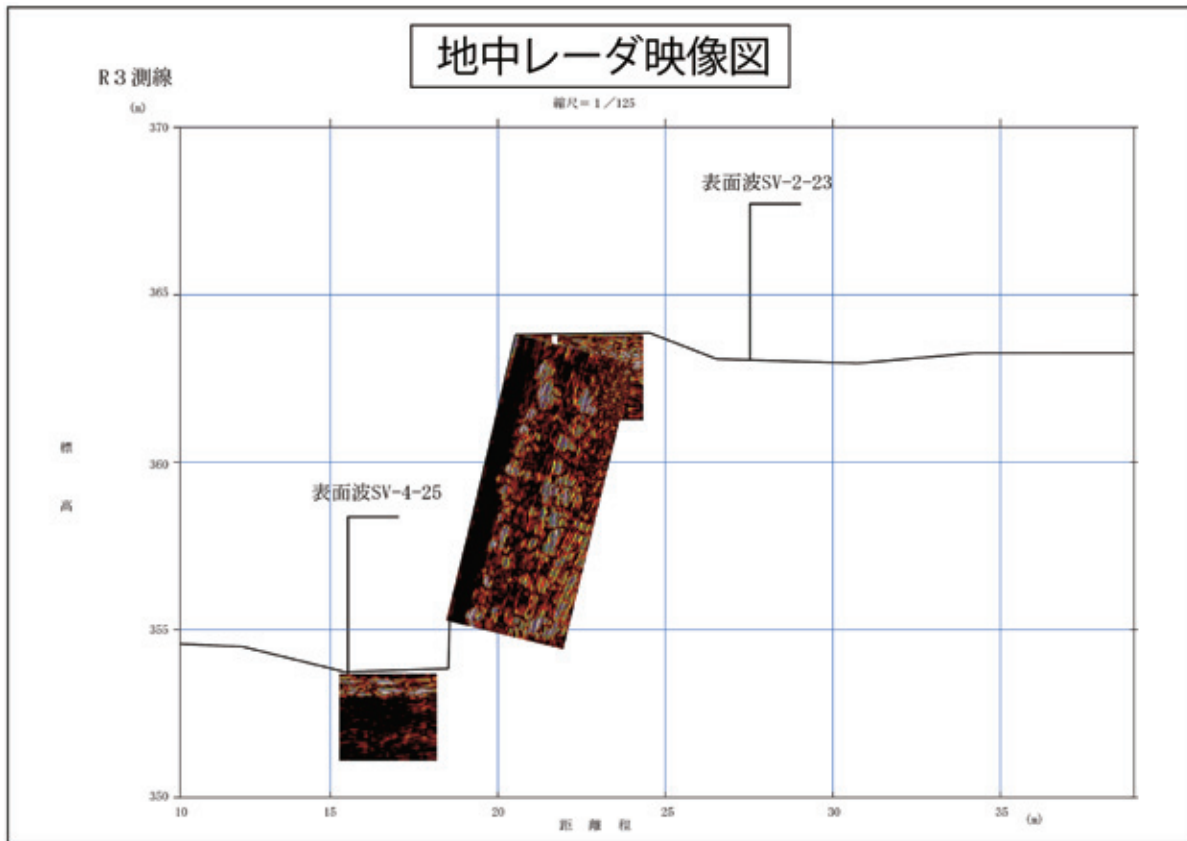


(c) R2測線

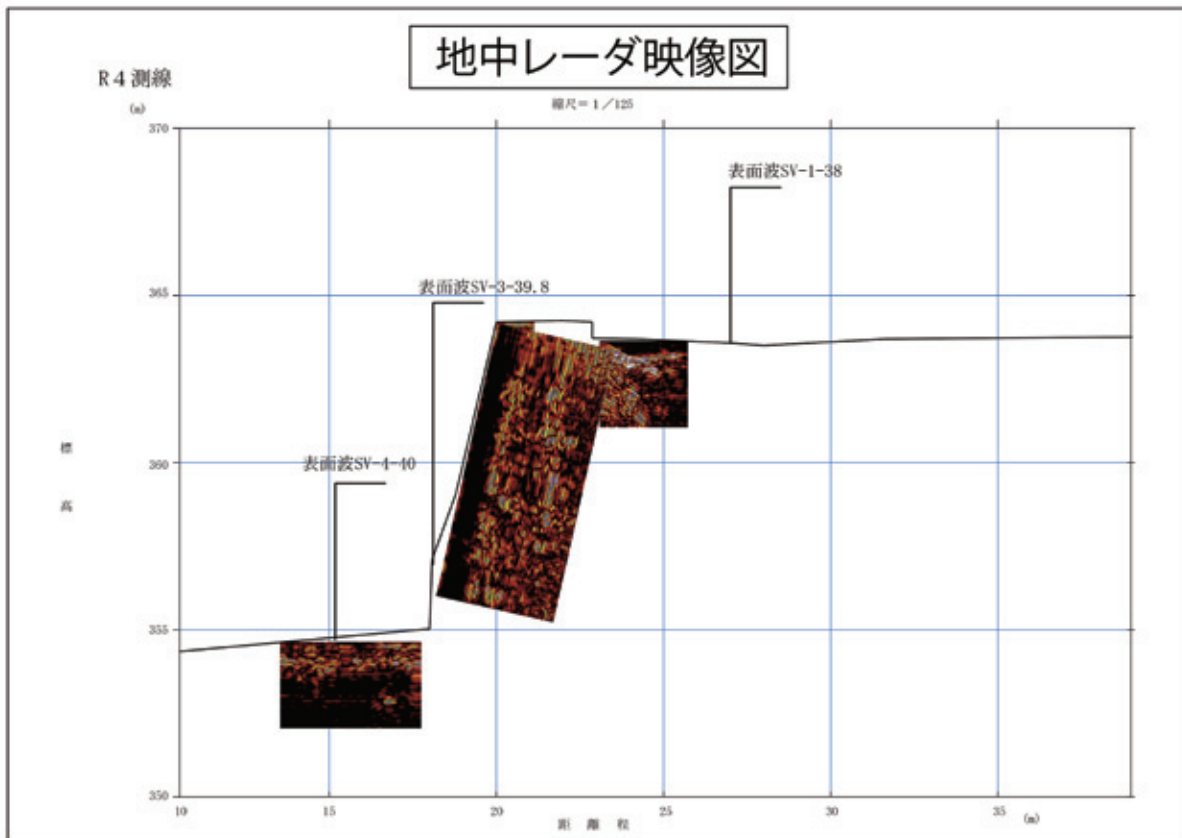


(d) R5測線

図-18 石垣横断方向における各側線の地中レーダ探査結果 (その1)



(a) R3測線



(b) R4測線

図-19 石垣横断方向における各側線の地中レーダ探査結果 (その2)

(4) 崩壊原因の推定

この探査結果により、石垣の崩壊原因が以下の要因であることが推定された。

- ① 崩壊した擁壁は、谷の集水部に水抜き穴がないコンクリート構造であったために、高さが高く大きな土圧の他に大きな水圧を受けていた。
- ② 盛土部の末端部で、地盤が柔らかいために増幅作用により強い地震動を受けた。
- ③ 崩壊した石垣は、大きな土圧と水圧を受けているところに、大きな地震動が加わった。

7. ま と め

小峰城の入り口の清水門の背後の本丸南面の石垣は、2011年東北地方太平洋沖地震により震度6強の揺れを生じ大きく崩壊した。しかし、地震での崩壊した原因が分からずに、地震前に形状の復旧が行われた。そこで、この被害原因を明らかにするために、表面波探査、弾性波探査、地中レーダの3つの探査を行った。

地盤探査の結果では、以下のことが明らかとなった。

- ① 表面波探査では、本丸側に向かって谷を埋めた盛土である。
- ② 弾性波探査では、崩壊した本丸南面石垣に向かって深い谷を埋めた盛土である。特に本丸南面石垣は、昭和57年の大雨によって崩壊した箇所側の方が深い谷である。
- ③ 地中レーダでは、石垣の構造を十分に把握することができる。

謝辞：本論文を作成するにあたり、北広島市の皆様のご協力をいただきました。この紙面をお借りしまして、厚く感謝申し上げます。

参考文献

- 1) 2013年(平成25)『KJ 8月号』にて事務所特集 株式会社 KJ「白河小峰城」(『週刊 日本の城 第43号』所収) 株式会社デアゴスティーニ・ジャパン
- 2) 福島県立図書館編集・発行：福島県郷土資料情報, No.57, 2017.3
- 3) 学習研究社出版：2009年(平成21)「白河小峰城天守」(『厳選日本名城探訪ガイド』所収), 2009.
- 4) 橋本隆雄, 石作克也, 松尾拓：熊本城の石垣タイプと被害の相関についての研究, 国士館大学理工学部紀要, 第12号(2019), pp.247-259, 2019.4.
- 5) 橋本隆雄, 石作克也, 松尾拓：2016年熊本地震による熊本城石垣崩壊メカニズムの分析, 第73回年次学術講演会, pp.GO11-01-11, 第15回日本地震工学シンポジウム The 15th Japan Earthquake Engineering Symposium, 日本地震工学会, 2018. 10.
- 6) 恒川怜央, 池本敏和, 宮島昌克, 橋本隆雄：2016年熊本地震における熊本城内の石垣被害および崩壊挙動解析, 歴史都市防災論文集, Vol. 12, pp.59-66, 2018. 7.
- 7) Reo Tsuneawa, Toshikazu Ikemoto, Masakatsu Miyajima and Takao Hashimoto : Collapse behavior and Analysis of Stone Retaining Masonry's damage in Kumamoto castle during the 2016 Kumamoto earthquake ISAIA (Proceedings of International Symposium on Architectural Interchanges in Asia), S2-10, pp. 1075-1079, 2018.10 (Pyeongchang, Korea)
- 8) 山中 稔：常時微動測定による近世城郭石垣の健全性評価技術の開発, 基盤研究(c)(一般), 課題番号25420508, 2015.
- 9) 橋本隆雄, 齊藤 猛：熊本城の微動アレイ探査の解析, 国士館大学理工学部紀要, 第12号(2019), pp.231-246, 2019.3.
- 10) 橋本隆雄, 斎藤猛：比抵抗2次元探査及び表面波探査による熊本城石垣等の地盤調査, 第2回石積擁壁の耐震診断及び補強法に関するシンポジウム論文集, 土木学会, pp.65-74, 2017.