

石造アーチ橋の構造と地中探査技術の応用*

Structures of Arch type Stone Masonry Bridge Obtained by Applying various Surveying Techniques

富岡 直人** 辻目 英正*** 長谷場 良二**** 吉原 進*****

By Tomioka Naoto, Nigeme Eisei, Haseba Ryouji, Yoshihara Susumu

要 旨

鹿児島県指定文化財西田橋の移設に際し、石材に損傷を与えることなく解体すべく事前に解体工法や手順に係わる内部構造を調査するため地中探査を実施した。今回の探査では、橋面下の石組構造には埋設物調査などに用いられる地中探査レーダ、ダボ鉄（存在の有無は解っていない）にはコンクリート構造物の鉄筋調査などに用いられるRCレーダ、基礎構造には地中探査レーダと地盤調査などに用いられる表面波探査の3種類の非破壊測定装置を用いた。これらの探査の結果として得られた測定記録は西田橋の解体計画と工事に有効に反映された。

1. はじめに

写真-1で示す明治初期の西田橋では楼門や取付部の階段がみてとれる。この他 史料調査では創建時より様々な改変を経ていることが解っているが、解体工法を検討する上で以下の構造の有無が必要な情報であった。

- (1) 橋面縦断の改修と橋体内部の創建時の痕跡の有無
- (2) 橋面敷石の有無
- (3) 取付階段の有無
- (4) 反力石垣の存在
- (5) 「ダボ鉄」の有無
- (6) 基礎構造で特別な工作物の有無
- (7) 護床敷石の構造、厚さ
- (8) その他支障物となる埋設物など

本調査は以上の構造の所在を確認し、解体工法や手順に資する目的で実施した。

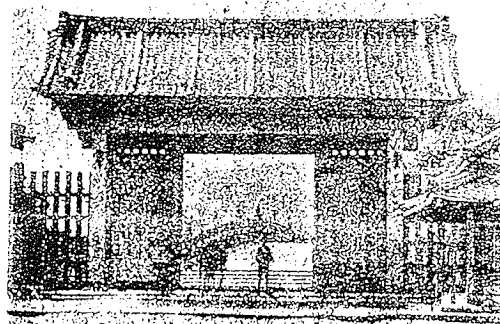


写真-1 明治初期の西田橋 出典 鹿児島市史
(東京大学資料編纂所蔵)

* keyword : 石造アーチ橋、地中探査技術

** ビイック(株)福岡事業所

*** 正会員 ほつま土木計画(株) (元 協和コンサルタンツ(株))

**** 正会員 鹿児島県土木部都市計画課

***** 正会員 工博 鹿児島大学工学部教授 西田橋解体復元調査委員会委員長

2. 調査内容

探査機器ごとの調査内容と調査範囲、数量を次に示す。

(1) 地中探査レーダ

a) 橋面調査

橋面敷石、袖部の石段、反力石垣の存在を確認することを目的として、橋面部縦横断、左右岸取付道路路面の計30測線、総延長460mの測定を実施。

b) 敷石下部調査

基礎構造の存在を確認することを目的として、1、2連目の敷石の計28測線、総延長360mの測定を実施。

(2) RCレーダ

石組に際し、「ダボ鉄」が使用されていないかを確認することを目的として、4連目部の下流側壁石及びアーチ石腹面半分の合端部において総延長126mの測定を実施。

(3) 表面波探査

橋脚基礎部の構造及び形状、深さなどについて3連目橋脚部の下流側において10地点で測定を実施。

3. 調査手法

(1) 地中探査レーダ

地中探査レーダは、電磁波を利用して行う反射法探査として海外で研究が行われ、極地における氷の厚さや岩盤の破碎帯などの探査が1960年代～1970年代にかけて実施され報告されている¹⁾。1970年代後半には土や岩などの一般的な地盤に対する適用²⁾が試みられてきた。これに対して、国内においても1980年代にはいと機械が輸入されて様々な研究・開発が開始されるようになり、試験的なものから始まり実用的な機器が製造されるようになった。

現在国内で利用されている地中探査レーダは、TVに使用されているVHF～UHF帯の周波数の電磁波を広帯域のパルス波として利用しており、この電磁波は真空中や空气中を伝播する場合には減衰が少なく良好な状態を維持するが、固体を媒体とする場合には電磁氣的損失による減衰が著しいという特徴を持つ。この減衰という欠点を考えても、電氣的性質の異なる境界面の存在によって反射が発生するという点は得難い性質である。

これらのことから、測定機から発射され地中に入った電磁波は透過・散乱・減衰を繰り返し、そのうちの一部が地表に戻り受信機に入力される。この地表に戻った反射波を測定するというシステムを地中探査レーダと称する。この際に得られるデータは反射波形で、どのぐらいの時間で到達した場所で反射が発生したのかが表示される形となっており、この反射が連続するものなのか部分的なものなのかが判断の材料となる。

現在使用されている地中探査レーダはこの受信された反射波形を振幅に応じて彩色し、断面図形式で測定器のカラーモニター上に表示するという形式のものが主流になっている。

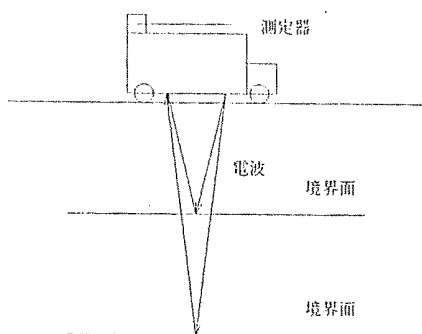


図-1 測定状況模式図

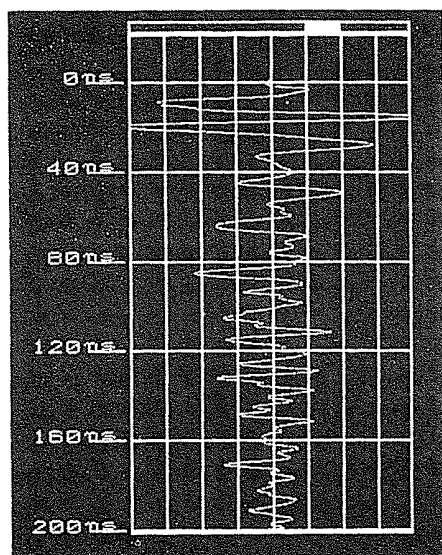


図-2 反射波形例

この装置は通常、道路下の空洞調査や埋設管調査、埋蔵文化財調査、トンネルのコンクリート背面空洞調査等に利用されており、メーカーによって周波数帯の異なる何種類もの測定器（アンテナ）が用意されており、いくつかの機種は特殊な調査専用型として造られて使用目的に応じて使い分けられている。

今回は各種の機器が存在する中から、日本無線（株）製の地中探査レーダJ E J - 5 1 型と中心周波数帯が400MHzの中型アンテナを用いて測定を実施したものである。

(2) RCレーダ

RCレーダは、地中探査レーダの特定目的専用改良型装置で、全体的に小型軽量化した測定器に中心周波数1GHzの電磁波を小さな出力で発生させることで、深度30cm程度のコンクリート厚やコンクリート内部の鉄筋、コンクリート背面の空洞などの探査に利用されており、地中探査レーダと同様に反射波形の強弱に応じてモニター上にモノクロの8階調で表示するものである。

今回利用したのは日本無線（株）製のJ E J - 6 0 型である。

3) 表面波探査

表面波探査は弾性波探査の一手法で、電気的にコントロールされる起振機を用いて地盤に振動を与え、その振動の伝播速度を測定するというものである。

地盤に地表面から衝撃を与えた際に発生する振動は通常の弾性波として良く知られているP波・S波という実体波と共に表面波と呼ばれる媒体表面を伝わる弾性波が発生する。地表面に鉛直な力を加えた際にはP波が鉛直方向、S波が45°の方向に最もエネルギーが集中するのに対して、地表面に添って伝わるこの表面波の特徴としては地表面において観測される振動の内、最もエネルギーの減衰が少ない波であることが挙げられる³⁾。このため、この振動を利用すると比較的小さなエネルギーでもその測定が容易であることからこの振動を利用した地盤調査の方法が表面波探査法である。この際に起振機をコントロールして振動させる

周波数を変える事で、地盤を伝わる振動の波長を変更し伝播領域（深度）を変化させて、それに伴い深度毎に変化する速度の情報を得ていく方法である⁴⁾。

図-3に示したのは、測定の様式図で震源（起振機）から発生させた波を受振器で検出し、現場測定記録として表示し、数値として解析するという状況を表したものである。

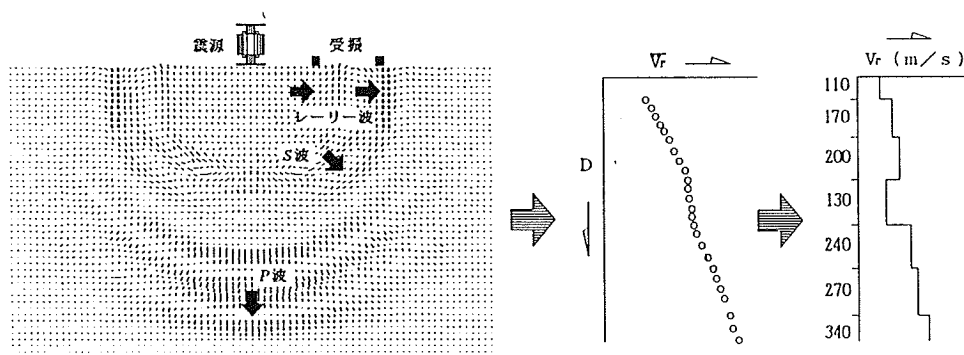


図-3 表面波探査模式図

この調査方法は主に地盤調査や基盤の分布状況調査、古洞調査、振動特性調査などに用いられている。今回利用したシステムはビイック（株）製GR-810システムと50L型起振機である。

4. 調査結果

先に述べたような3種類の調査方法を用いて測定を実施した結果、以下のように想定された。

(1) 橋面電磁波探査

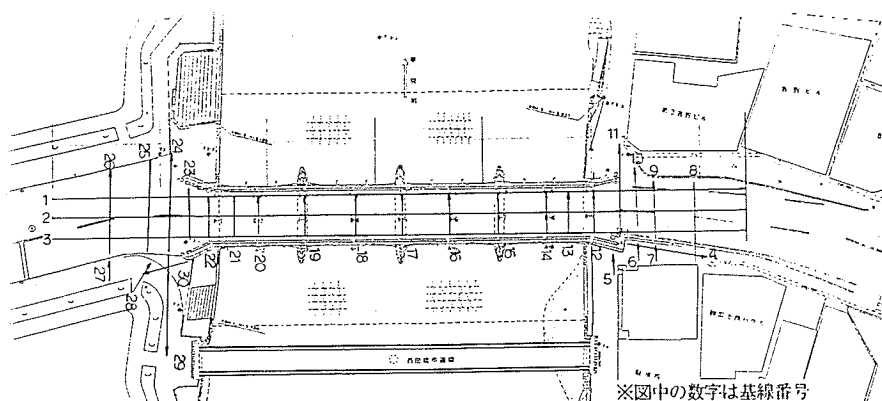


図-4 橋面電磁波探査基線図

a) 左岸側（図-5 参照）

- ・測線2の起点より9m付近まで、ほとんど反射がみられないために何らかの工事で土砂による埋戻しが施工されているものと考えられる。
- ・9mから14m付近では、上下水道管などの埋設物が認められるものの、全般的には石橋の構造層らしい反射が認められ、古いものが残っている可能性もある。
- ・測線2の両岸部には、外（陸側）に向かって傾斜するような構造がみられる（図-5 13～28m付近）。

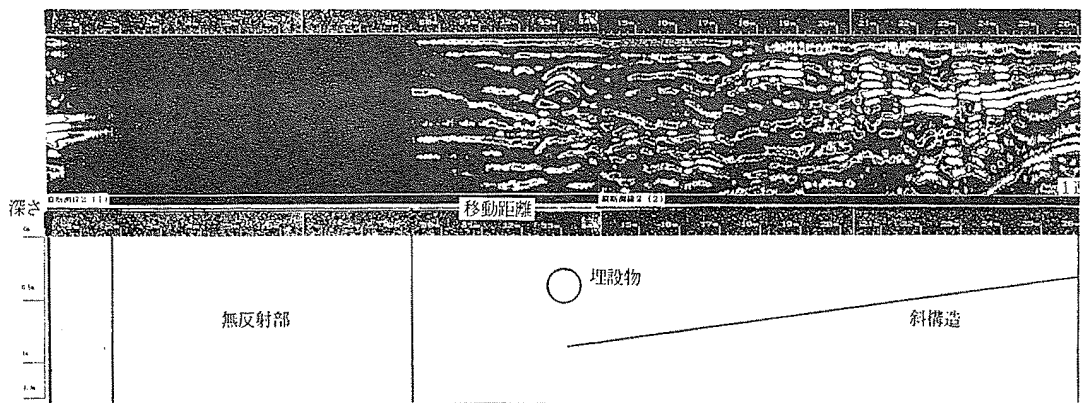


図-5 左岸側測定記録（測線2）

b) 橋梁部（図-6 参照）

- ・河川内橋梁上部においては、敷石構造と想定される小刻みな反射が互い違いにみられ、全域で敷石の存在が想定される。
- ・橋脚部地中においては、ある程度の深さまで石材の存在と想定される反射がみられる。

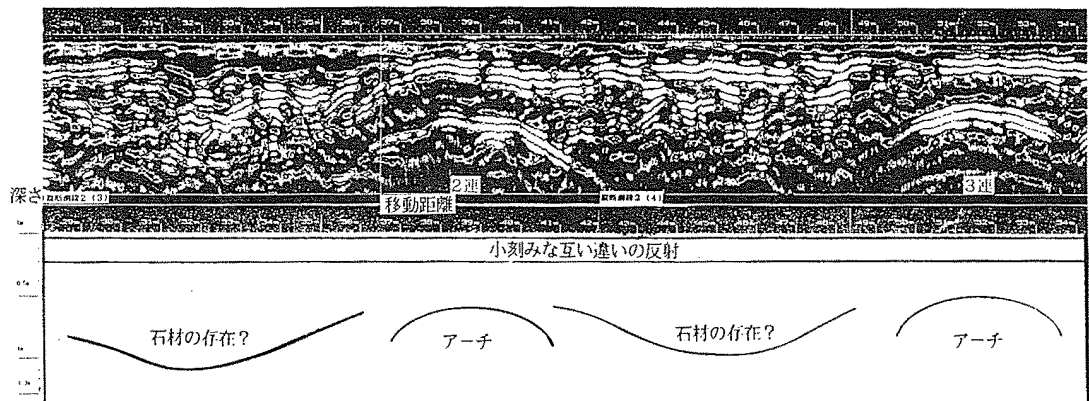


図-6 橋梁部測定記録（測線2）

c) 右岸側（図-7 参照）

- ・測線1で74～81m付近には、埋設物（構造物）が存在する可能性がある。
- ・71～73m付近で一旦反射の強い層が途切れるように見えるため構造が変化している可能性がある。

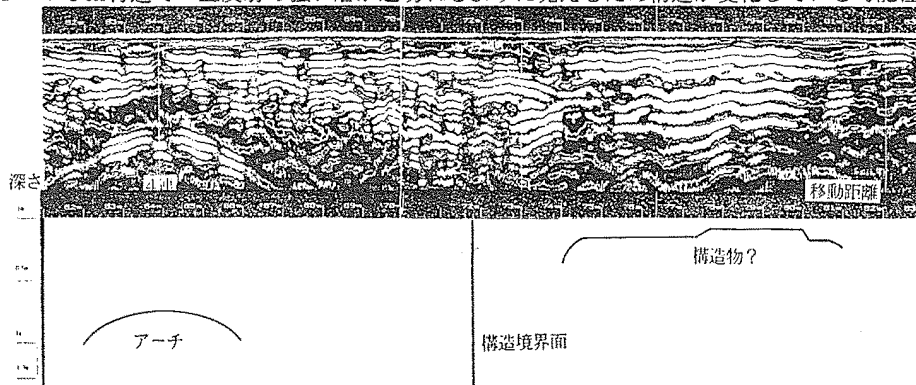


図-7 右岸部測定記録（測線1）

(2) 橋体RCレーダ探査

測定記録の一例を図に示すがこれは以下のように考えられる。

a) 局所的な強い反射 (■)

合端中において強い物性差を示すため、金属類が測線の直下に存在する場合が想定され、鉄片の反射がこれに相当するものと考えられる。

b) 局所的な弱い反射 (□)

それほど大きな物性差を示すわけではないが、反射の形状から考えると硬い物質が合端部に混入しているないしは、測線のすぐ脇に金属類が存在することによって生じたものと考えられる。

c) 連続的な弱い反射 (□)

これはある一定の深さに線状の反射がみられるもので、石積内部の継ぎ目や亀裂の存在、砂などの混入物によって生じたものと想定される。

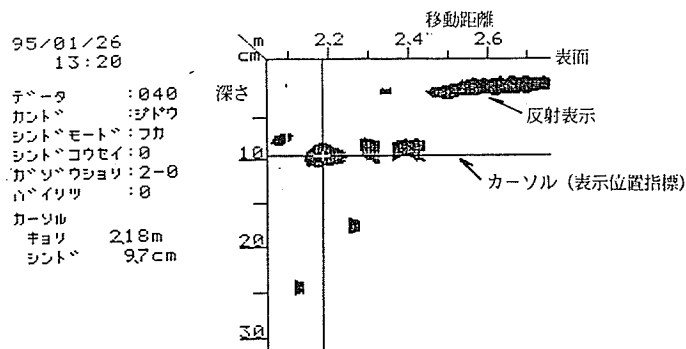


図-8 RCレーダ測定記録例

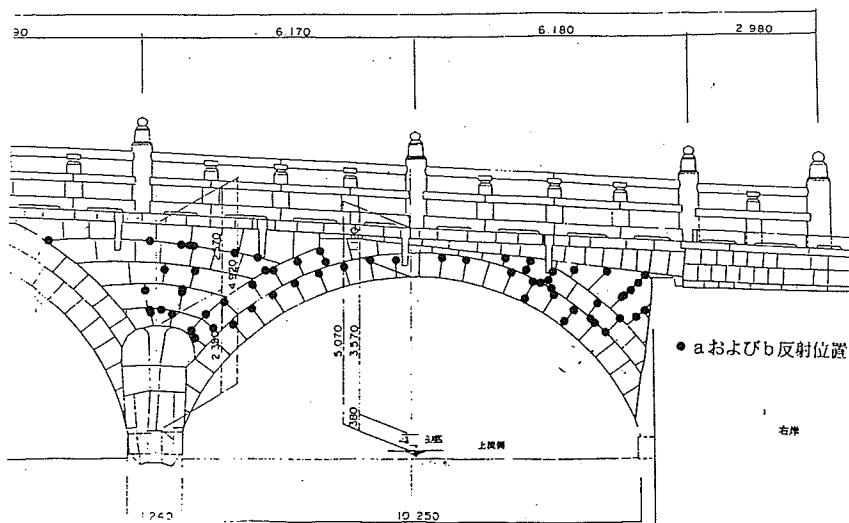


図-9 RCレーダ検出位置

以上の区分で、a及びbに分類した反射が今回の調査対象である金属類に相当するものと考えられ、反射のみられる深さは表面付近～28cmと幅があり、その出現が不規則で構造的な配置は確認できなかった。これらは、合端の調整に用いられていた鉄片と想定される。

(3) 基礎部表面波探査

図-11に示したNo.4, 5, 6地点の下部において振動を伝えないもの（広がりを持つ硬いものなど）が探知された。

No.4, 5から50cm離れた位置No.3, 10及び1m離れたNo.7の記録には構造物によるものと考えられる影響がみられることから、No.4, 5, 6地点の下部には何らかの硬いものが存在していると考えられる。

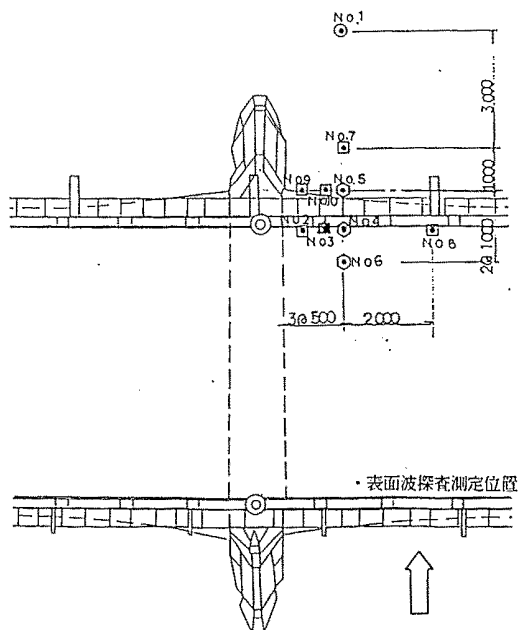


図-10 基礎部表面波探査測定位置

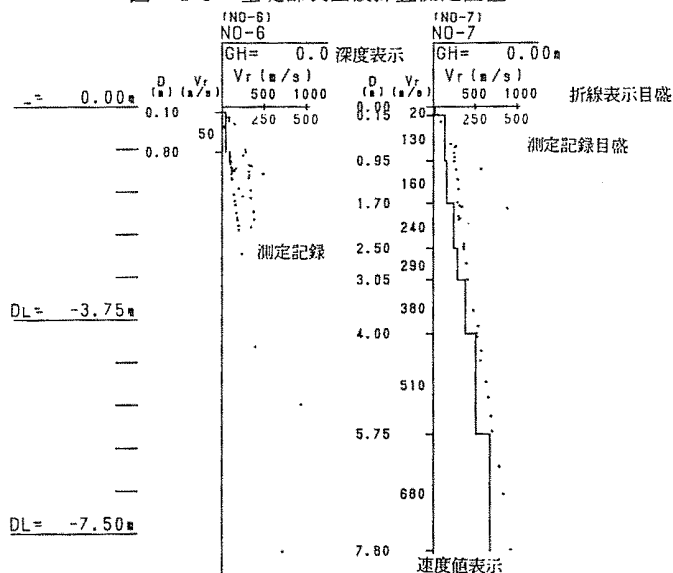
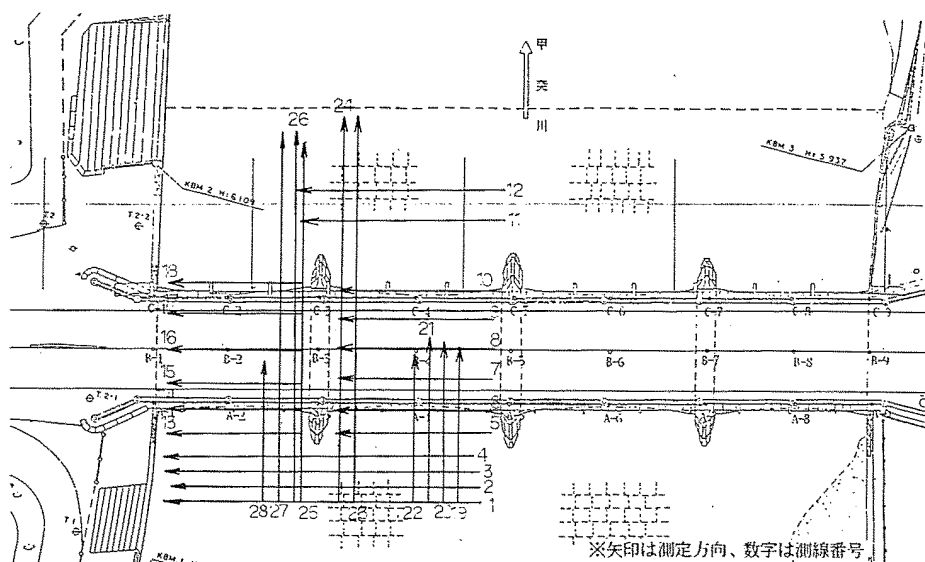


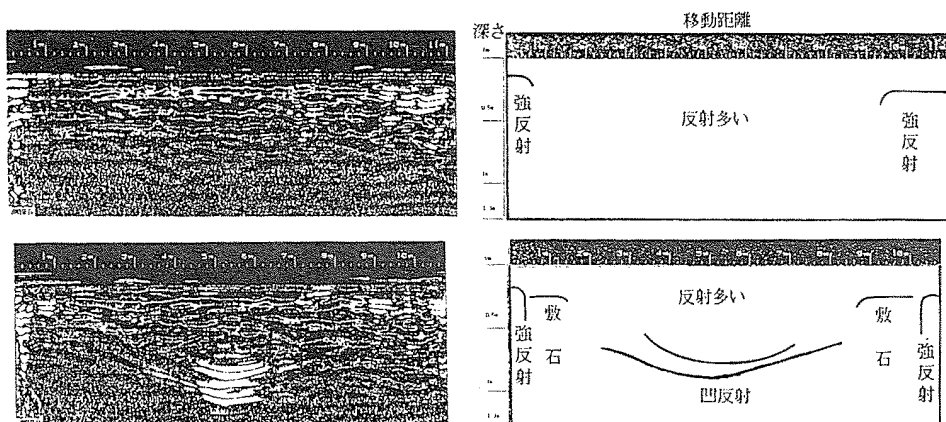
図-11 表面波探査測定記録例（左側No.6, 右側No.7）

(4) 敷石下部電磁波探査

- ・ 橋脚間の縦断方向測線（右岸側から左岸側方向の測線）の始点及び終点付近において強い反射がみられ橋脚基礎の構造ないしは石の密集部、混入物などの存在が想定される。
- ・ 橋脚間には敷石が橋脚付近で2層、中心部で1層存在していると考えられるが、この1層の下部において不規則な反射がみられるため、不規則な敷石または石の密集部が存在するものと考えられる。
- ・ 1連・2連間の橋軸方向測線には、凹型を示す反射がみられ人為的構造物の存在が想定される。この凹状反射は2重の構造を表すような反射を示している。これらの反射は橋梁下部に限定されるものと考えられる。



図－1 2 敷石部調査位置図



図－1 3 測定記録例（測線5は橋梁から外れた位置、測線8は橋梁下部での測定記録）

5. 考察

西田橋において実施した今回の測定は、通常と異なって、石橋という特殊な対象であり、中に何が存在しているのか予想できない面がある。しかし、探査で得られた手がかりは解体工事の施工法や手順を検討する上で留意事項の目安となる。

予測された構造の当否は、現在、西田橋が解体調査中であり、順次探査結果に対する本来の状態が判明するため、これらを照合して今後の同様な調査に対する参考となるように考えたい。

【参考文献】

- 1) 原徹夫 et al, 日本充てん協会 (1983)
- 2) Annan A. p. and J. L. Davis (1977)
- 3) Woods et al, (1968): VIBRATION OF SOILS AND FOUNDATIONS
- 4) 渡部儀一 et al, 日本物理探査学会 1984