

# 磁気探査を用いた既設橋台基礎杭の配列調査

鈴木一彦<sup>1</sup>・入手麻美<sup>2</sup>・高橋幹雄<sup>3</sup>・田口雅章<sup>4</sup>・小野日出男<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 (株)東京ソイルリサーチ名古屋支店技術調査課 (〒450-0002 名古屋市中村区名駅三丁目9番13号)

<sup>2</sup>静岡県富士土木事務所 (〒416-0906 富士市本市場441番1号)

<sup>3</sup>(株)長大名古屋支店構造事業部 (〒450-0003 名古屋市中村区名駅南1丁目18番24号)

<sup>4</sup>正会員 (株)東京ソイルリサーチ本店技術部(〒153-0042 東京都目黒区青葉台三丁目10番1号)

<sup>5</sup>正会員 (株)東京ソイルリサーチ本社技術本部(〒152-0021 東京都目黒区東が丘二丁目11番16号)

高度経済成長期に整備された橋梁の多くは、今後、急速に老朽化が進行するといわれている。老朽化した橋梁は、設計図書等が散逸していることも多く、形状寸法が分からないことがある。そのため、杭基礎で支持された橋梁の場合には、基礎杭の種類、杭長、杭の配列などを確認する損傷調査を行い、基礎杭を含めた橋台・橋脚の劣化度を評価する必要がある。

本文では、老朽化した橋梁の橋台基礎に対する補修・補強設計に先立ち、試掘によって基礎杭の杭種や杭位置を確認したほか、3本の観測孔を設けて磁気探査を行い、杭長および杭配列を推定し、補修・補強設計の基礎資料とした事例を報告するものである。

**KeyWords :** magnetic prospecting, test pitting, pile length investigation, pile arrangement investigation

## 1. はじめに

橋梁をはじめとする道路構造物の多くは、高度経済成長期に整備されたため、これらの老朽化が急速に進行することが予想されている。公共投資の縮減が叫ばれているなか、老朽化に伴い、橋梁の架け替えなどを行うには、多額の事業費が必要となり、新規の建設は厳しい状況となっている。また、経年化した橋梁の基礎は、耐震性に対しても当初の性能を満足することができるか否かも問題となっている。このことから、損傷を調査して補修・補強の必要性を評価することや、古い橋梁などで、設計図書等が散逸している場合には、形状寸法のわからない橋梁基礎に対し、適切な手法を用いて、橋梁基礎の診断並びに評価を行い、より長期にわたって使用することが社会的要請である。

筆者らは、その一環として、地中にある橋台基礎の杭長や杭配列などの形状調査を目的として、杭頭周辺部の掘削による杭頭部の目視確認および磁気探査を行った。

本文では、静岡県富士市にある「毘沙門橋」の補修・補強設計および補強工事にあたり、既設橋台基礎の杭長ならびに杭配列を調査した事例について報告する。

## 2. 対象構造物の概要

### (1) 損傷状況

調査対象となった毘沙門橋は、県道富士清水線（旧国道1号線）の沼川に架かる橋梁で、1957年（昭和32年）7月に建設された全長89.2m、幅員10.35mの規模をもつ3径間鋼ゲルバー橋である。

橋梁の維持・管理にあたり、2000年（平成12年）7月に、補修・補強の必要性を検討するため、損傷調査が行なわれている。その結果、図-1に示すように橋台下部工では、側方流動に起因する桁押がみられ、橋台が前面に70mm移動していることが確認された。

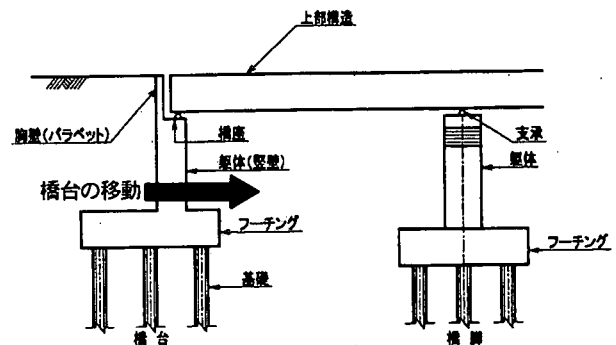


図-1 毘沙門橋の現状（模式図）

また、主桁の上下フランジがパラペットと接触しているほか、橋台に固定しているアンカーボルトが変形するなどの損傷が明らかになり、このまま供用を続けると、地震時に落橋も懸念され、“橋台は現在、移動が止まっていると考えられるが、地震時に大きな水平力が働くため、補強が必要である”と判定された。

一方、上部工においても、床版、主桁、支承、排水装置などで下部工と同じように、補強が必要であると判定された。

## (2) 杭基礎の諸元

橋台・橋脚は杭基礎によって支持されているものの、橋梁基礎に関する詳細な情報は無い。ただし、当時の資料によれば、杭種はRC杭の可能性が高いと判断された。そのため、補強設計および補強工事に先立ち、橋台を支持している杭基礎の杭種、杭長、配列状況などの諸元を詳細に確認する必要が生じた。

## 3. 非破壊試験による調査

### (1) 環境条件

当該地は、JR東海道線吉原駅の東北東約1.5kmのところまに位置している。周辺地域一帯は、沼川をはじめとする周辺の河川によって形成された沖積低地に相当する。地盤構成は、既存のボーリング調査によると、表-1に示すように、礫質土を主体とする洪積層の上部に粘性土を主体とする沖積層が約20mの厚さで堆積している。

表-1 当該地の地盤構成

深度 (m)	構成土質	N値	堆積時代
～ -2.6	礫質土 (埋土)	10	現世
～-11.9	シルト	3～5	完新世
～-16.8	シルト質砂	12～20	
～-20.1	シルト	5～8	
-20.1以深	砂・礫質土	>50	更新世

このほか、橋梁に平行に張り出している歩道橋が1998年(平成10年)に増設され、GL-20.1m以深に堆積する洪積層を支持層とする鋼管杭によって支持された基礎が、橋台に隣接して配置されている。

### (2) 調査方法の選択

現在、橋梁は供用されている。付近に国道1号線の今井北交差点があるため、交通量が比較的多く、調査のために通行止めにすることは現実的に困難であることから、調査は交通障害をおこさずに実施する方法を

採用する必要があった。また、既設の杭も補強して再利用する方針であったため、杭に損傷を与えることもできなかった。これらに加え、橋台部の周囲を広範囲に掘削して、多くの杭を直接、目視観察するスペースを確保することができない状況であった。

以上の理由から、今回は非破壊試験を採用して、調査を実施する必要があった。

### (3) 非破壊試験の種類

橋梁基礎の形状や損傷調査を目的とした調査手法には、表-2に示すものが多用されている。

当該地では、①杭長の把握、②杭配列の把握が目的となることから、表-2を参考にすると、磁気探査もしくはポアホールレーダーが適用可能となり、これら以外は適用不可能となった。ただし、当該地は沿岸部にあたり、沖積粘性土層によって厚く覆われ、地下水も河川水面付近に帯水している環境条件下のため、ポアホールレーダーの採用は不適当となり、磁気探査のみが最適な調査手法と判断された。

表-2 非破壊試験の種類

調査法	適用			備考
	損傷	杭長	配列	
IT試験	○	○	×	杭頭周辺部を掘削して、杭を直接打診する必要がある。
磁気探査	×	○	△	測定孔を必要とする。周辺の磁気に影響され易い。
AE法	○	△	×	測定孔を必要とする。対象物に荷重が必要である。
衝撃振動試験	○	×	×	下部工全体の健全性を評価するが、杭長や杭配列は調査できない。
ポアホールレーダー	△	○	○	塩分を含み、地下水位の浅い沖積地盤での適用は困難である。
ポアホールカメラ	○	○	×	杭体内を削孔し、杭体内部にカメラを挿入するので、杭の補強が必要となる。

記号 ○：適用可能、△：ある条件下で適用可能、×：適用不可能

## 4. 磁気探査

### (1) 磁気探査の概要

鉄類はそれ自身が持つ残留磁気と、その場所の地球磁場による感応磁気によって帯磁している。このため鋼材を含む杭の近くでは、地球磁場が局所的に乱されている。磁気探査は強磁性体の位置を測定することにより杭の位置を特定する方法で、古くから不発爆弾等の埋設物調査に用いられていた。

杭のような細長い鉄類では、その両端付近に磁極が生じ、図-2に示すように基礎杭の強磁性体の近くに磁束が集中する（磁気量が大きい）。そのため、杭の周囲に設置した観測孔に挿入した磁気センサーで連続的に磁気量を測定することにより、杭端位置を推定することが可能となる。また、杭を横断するように観測孔を斜めに配置して測定することにより、杭の配列を推定することも可能である。

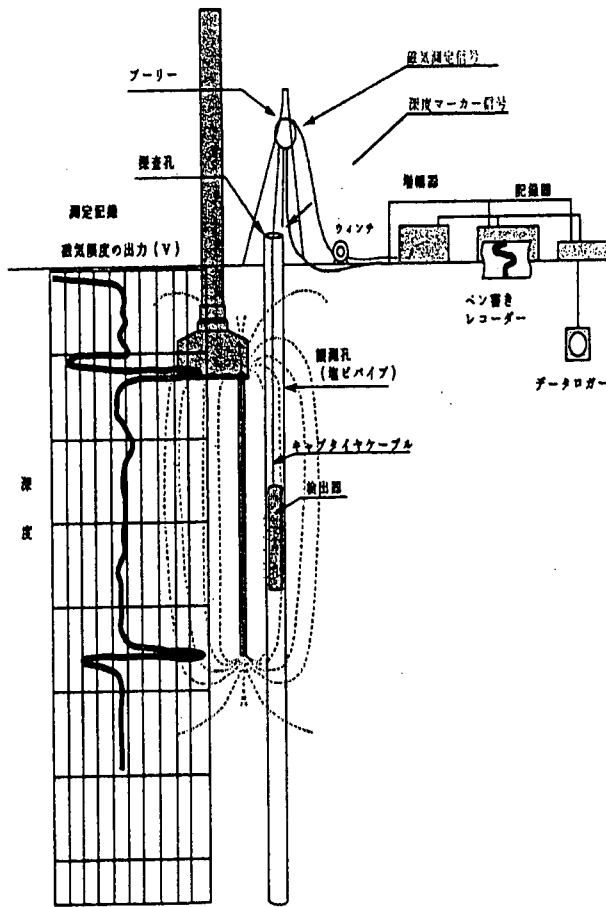


図-2 磁気探査概念図<sup>1)</sup>

## (2) 磁気探査の原理

帯磁物の磁気量は地球磁場に比べて非常に小さいため、これを測定するには特別な検出器が必要である。現在、磁気検出には表-3に示すように3つの方式がある。このうち、杭長調査や杭の形状調査を目的とした磁気探査には、図-3に示すフラックスメーター磁力計（両コイル型磁気傾度計）が一般的に用いられている。このフラックスメーター磁力計は、コイルの断面を横切る磁力線の変化に応じてコイルの両端に誘導起電力が生じることを利用して、磁気量の変化（磁気傾度）を測るものである。

表-3 各種磁力計比較表<sup>1)</sup>

項目	フラックスメーター磁力計	フラックスゲート磁力計	光磁気共鳴磁力計
感度	10 $\gamma$	1~0.1 $\gamma$	0.01 $\gamma$
検知信号	電圧	電圧	周波数
方向性	有	1軸有 (検出器軸方向) 3軸 (全磁場)	無 (全磁場)
測定方法	連続測定	連続測定	連続測定
作業性	一定速度で曳航	速度に関係なし	速度に関係なし
構造	簡単であるが2つのコイルの平行度を精度よくすることが必要	1軸の場合： やや複雑 3軸の場合： 複雑	複雑、ランプの寿命に限度あり
価格	低	中	高

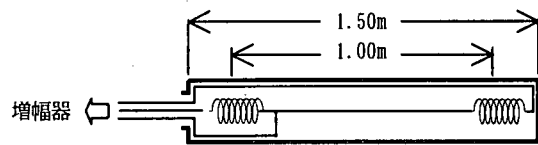


図-3 フラックスメーター磁力計

## (3) 使用機器

使用した機器は、図-4に示すように、センサー（フラックスメーター磁力計）、増幅器、アナログ記録器、データ収録器、ウインチ、プーリー、カウンターなどで構成されている。

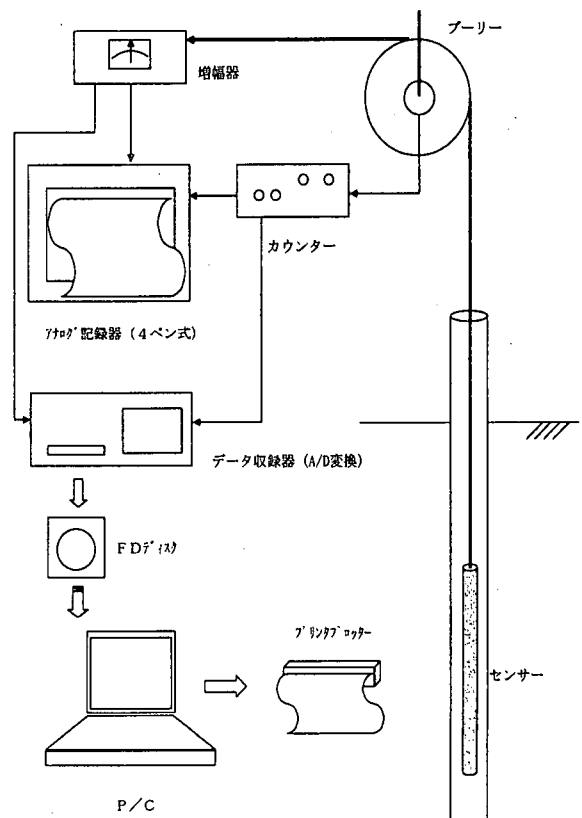


図-4 測定機の構成<sup>1)</sup>

(4) 探査手順

当該地では基礎形状の情報が少ないため、①試掘による杭の目視確認後、②磁気探査による杭長および杭配置の調査を行った。試掘は基礎横に縦坑を掘り、橋台の一番外側の杭（1本）を目視確認した。その後、図-5の手順で探査を実施した。

測定は20msの等時間間隔でサンプリングし、1m間隔に入れた深度マークを基に、深度を補正している。

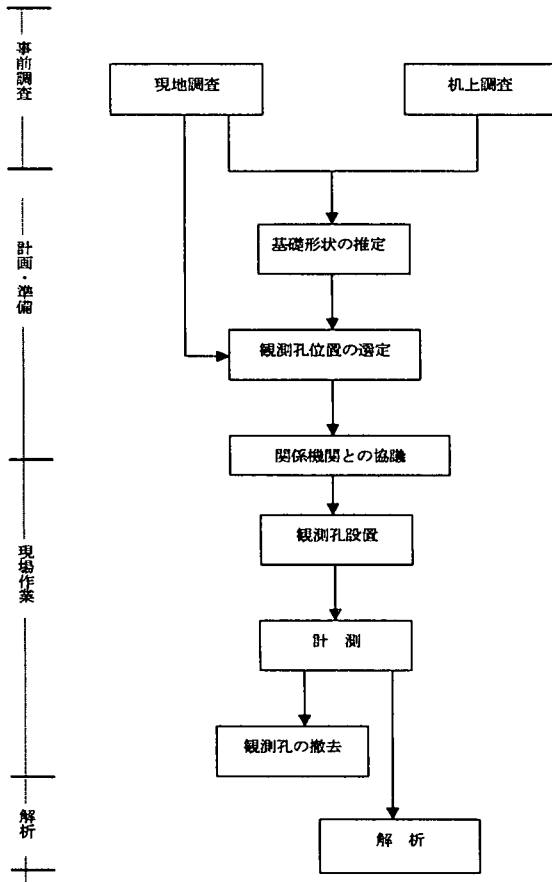


図-5 磁気探査の流れ（杭長調査の場合）<sup>1)</sup>

(5) 解析手法<sup>1)</sup>

地中に埋設しているRC杭は鉄筋で構成されているため、一次近似として、杭の側面にN極・S極が帯磁していると考えられる。磁気センサーと杭の一方の極との距離が近く、杭の磁極が単極の場合、磁気センサーの両端に生じる起電圧Eは、図-6に示すように変化する。

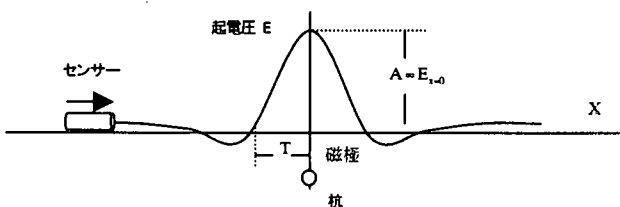


図-6 磁気異常波形

実際に測定される杭の磁気異常波形は、図-7に示すように、杭の軸上に双極子が一様に分布するとして処理している。

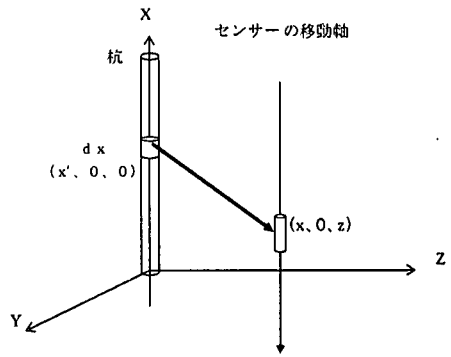
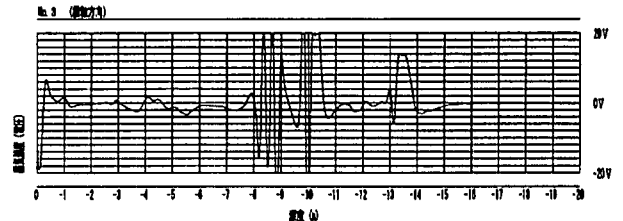


図-7 解析モデル図（杭長調査）

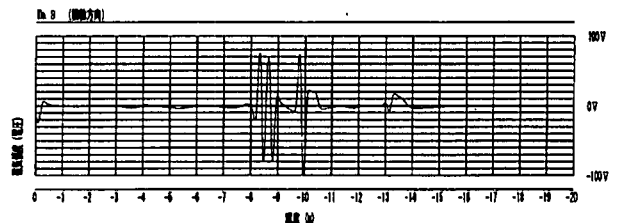
得られた測定波形から、振幅を一定に調整して計算波形を設定し、モデル波形と比較してよく一致するパラメータをみつけることにより、磁気異常位置を同定する。

図-8は観測孔No.3地点で得られた測定波形である。

上段は、杭に反応した異常波形を表すため、振幅（起電力）レンジを20Vで表示し、下段は、異常波形の全体像を写すため、レンジを100Vと大きくとっている。



a) No3 地点, 20V レンジ



b) No3 地点, 100V レンジ

図-8 測定波形

図-9は、測定レンジを変更して、各測定深度におけるモデル計算波形の当てはめの様子を示したものである。本調査では、試掘によって杭の位置を1本確認しているため、それをキャリブレーションとして基準にし、モデル波形の当てはめを行った。さらに観測孔No.2地点の杭配列調査結果からも、観測孔から杭までの距離が最大でも0.5m程度であると判断して、モデル波形を絞り込んだ。

## 5. 現場状況

### (1) 観測孔の位置

当該地では、観測孔の位置選定にあたり、以下に示す3つの制限があった。

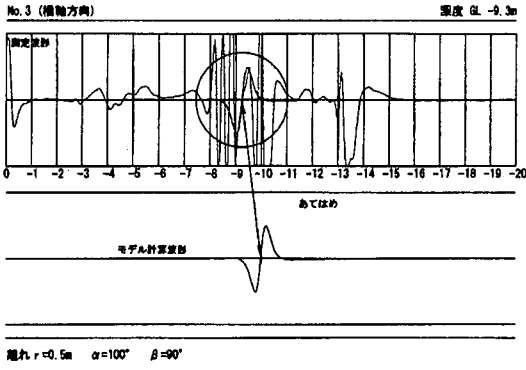
- ①調査位置の物理的制限
- ②RC杭による磁気探査精度の制限
- ③既設歩道橋基礎杭（鋼管杭）の影響による制限

なお、過去の測定実績から、磁気探査の適用にあたり、観測孔の設置位置条件として、表-4が提案されている。

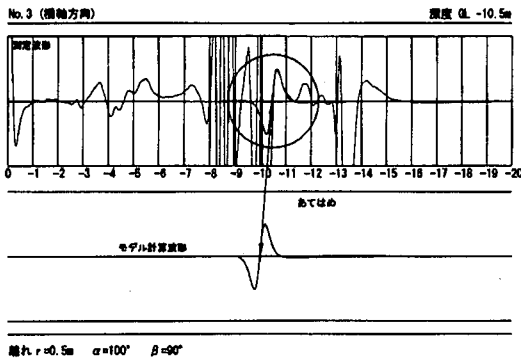
表-4 観測孔の設置位置条件<sup>1)</sup>

調査対象	杭種	観測孔離れ
杭長調査	鋼管杭	1.5m以内
	RC杭, PHC杭 (PC杭) 場所打ち杭	1.0m以内
杭配列調査	杭種問わず	0.5m以内

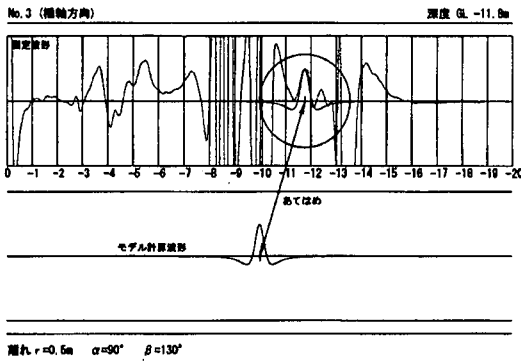
当該地の3つの制限と、表-4の探査孔設置位置条件から、図-10に示す最適な磁気探査の観測孔の位置として計3地点を決定した。当初、観測位置は全く反対側の道路に設ける予定であったが、張り出し歩道橋の影響等から物理的に探査が不可能であると判断されたため、橋桁下からの調査となった。



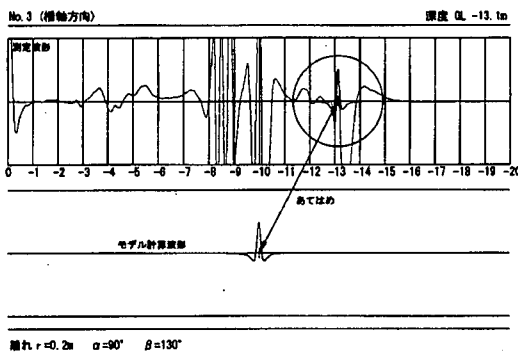
a) 深度 G.L. -9.3m 付近



b) 深度 G.L. -10.5m 付近



c) 深度 G.L. -11.8m 付近



d) 深度 G.L. -13.1m 付近

図-9 モデル計算波形への当てはめ図 (No.3地点)

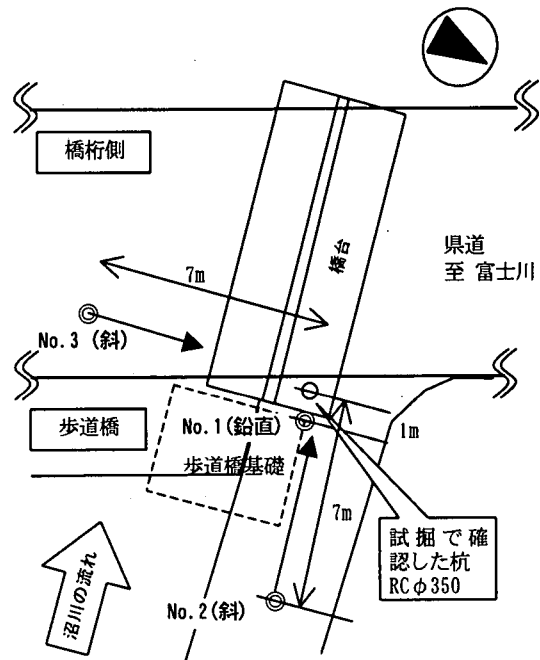


図-10 観測孔位置平面図

橋軸直角方向に斜めに設置した観測孔No.2の測定状況を写真-1に、橋桁下で実施した橋軸方向に斜めに設置した観測孔No.3の測定状況を写真-2にそれぞれ示す。



写真-1 観測孔No.2の測定状況

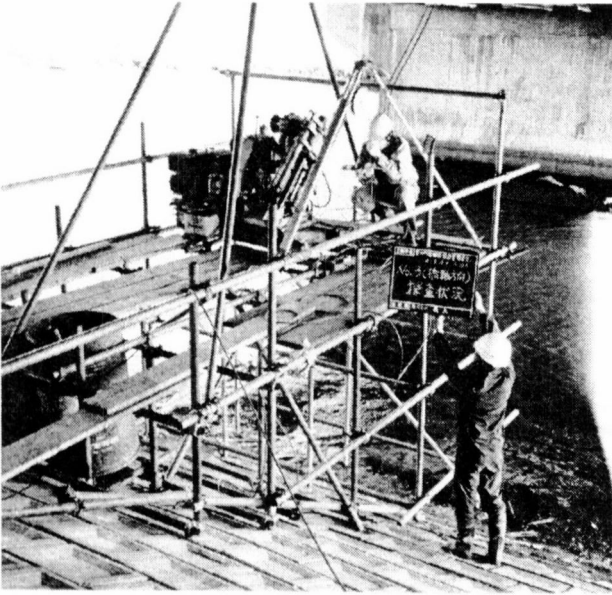


写真-2 観測孔No.3の測定状況

## (2) 観測孔の仕様

磁気探査の観測孔の仕様を、表-5にまとめた。いずれも、既存のボーリング調査の結果をもとに、鉛直の観測孔を1か所、斜めの観測孔を2か所それぞれ機械ボーリングによって設置した。なお、観測孔はエンピ管 (VP50) によって、孔口まで保護した。

表-5 磁気探査の観測孔の仕様一覧表

番号	杭との離れ(m)	鉛直角度	保護材	観測孔長(m)
No.1	1.0	垂直	VP50	25
No.2	0.5	約47°	VP50	29
No.3	0.5	約42°	VP50	20

## 6. 調査結果

### (1) 試掘調査結果

橋台下部を試掘して、杭頭部を目視確認したところ、

RC杭 (φ350mm) が確認された (図-10 参照)。このRC杭の平面位置を、磁器探査の結果に対する検討資料として活用した。

### (2) 杭長調査結果 (No.1 地点)

図-11はNo.1地点における杭長調査の結果 (実測波形) をまとめたものであり、GH-10.6mおよび-16.3m付近にて磁気異常が認められる。

#### a) GH-10.6m付近

モデル波形を当てはめると、水平距離で0.85mの位置に磁気反応が検出された。ただし、後述する杭配列調査では、橋台の下には鉄類による大きな異常反応が多くみられることや、この深度では杭先端が支持層に達していないことから、この磁気反応は鉄類に影響されたものと判断した。

#### b) GH-16.3m付近

モデル波形を当てはめると、水平距離2.7mの位置に杭先端と思われる磁気反応が検出された。しかし、水平距離が試掘で確認した杭の位置に比べると異なる結果になった。

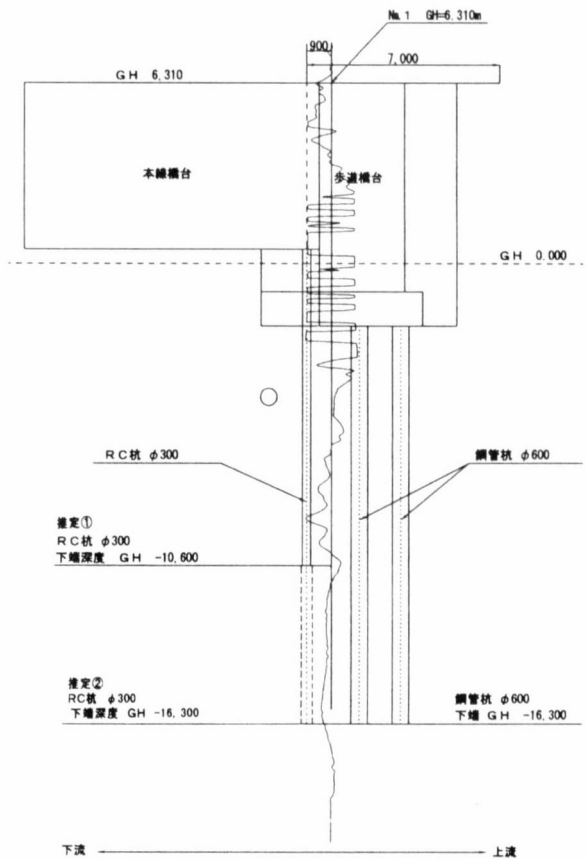


図-11 杭長調査結果図

この点については、隣接する歩道橋の基礎は鋼管杭であり、その反応に影響されて波形が重なり合ってしまった可能性が高いものの、橋台の基礎杭の先端からの磁気反応と判断した。

このことから、地盤構成を考慮して、杭の先端深度をGH-16.3m付近とした。

### (3) 杭配列調査結果 (No.2, 3地点)

図-12 は橋軸直角方向 (橋桁に直角, No.2地点), 図-13 は橋軸方向 (橋桁に平行, No.3地点) の杭配列調査の結果をそれぞれ断面図にまとめたものである。

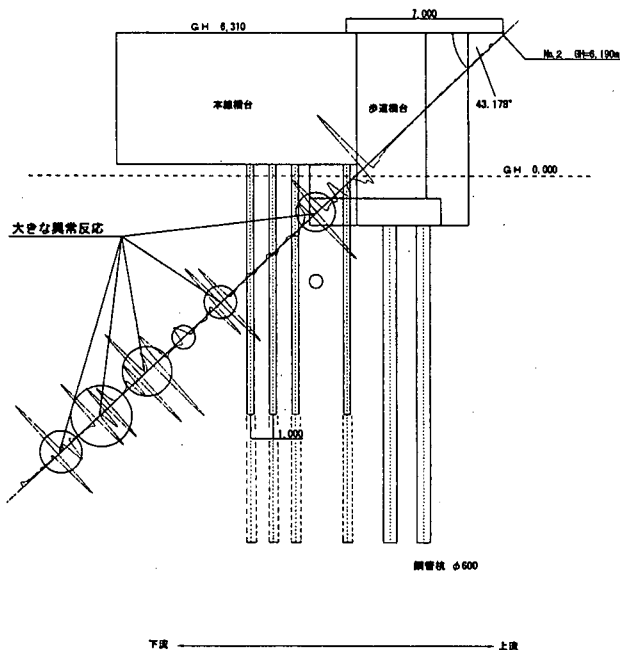


図-12 杭配列調査結果図 (橋軸直角方向, No.2地点)

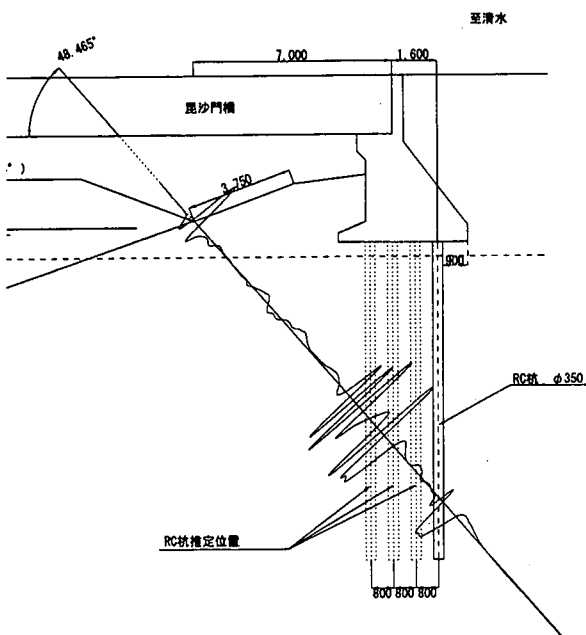


図-13 杭配列調査結果図 (橋軸方向, No.3地点)

No.2地点 (橋軸直角方向) では、全体的に大きな磁気異常が認められ、杭からの反応を識別するのが困難な状況であった。その中でも異常反応が小さくなっている区間で、杭の反応と思われるものを拾い出して解析を行なった。その結果、孔口から 12.7m, 14.1m, 15.5mの深度に杭の存在が予想された。この間の水平距離は、観測孔の角度(43.2°)を基に換算すると 1.02mとなることから、杭は約 1m間隔で施工されていると推定した。

No.3地点 (橋軸方向) も、全体的に大きな磁気異常が認められ、杭からの反応を識別するのが困難な状況であった。試掘による目視確認によって、杭は観測孔の孔口から 13mのところ的存在していることが明らかたため、橋台の形状から杭が存在する可能性があるのは孔口から 8~13mの区間とした。そのため、13m付近と 12m付近で解析してみると、13.1mと 11.8mの位置に杭の存在が推定された。磁気異常の距離間隔は斜めの距離で 1.3mなので、水平距離に換算すると 0.8mとなり、試掘によって確認された杭より 0.8m離れた位置に杭があると推定された。ただし、杭の配列は、この距離で 2列になっていることは考えられないため、されに 2列の杭が存在するものと推定すると、解析のように磁気異常の位置が 10.5mと 9.3mとなった。このことから、杭は 0.8m間隔で、4列存在すると推定した。

### (4) 調査結果のまとめ

磁気探査による調査結果から、杭長は GH-16.3m付近と推定され、洪積層に支持されていることが判明した。杭の配列は、橋軸直角方向で試掘によって確認した杭を先頭に 1m間隔で配置され、また、橋軸方向では 0.8m間隔で 2列間が把握できたことから、おおよそ 4列配列であることが推定された。

表-6 は、杭の先端深度や位置 (配列) をまとめたものである。

表-6 磁気探査による調査結果一覧表

磁気探査観測孔	確認深度 (m)	センサーからの距離 (m)	備考
No.1 (鉛直)	GH-10.6	0.85	杭の下端
No.2 (斜)	GL-12.7	0.40	杭の位置
	GL-14.1	0.40	杭の位置
	GL-15.5	0.40	杭の位置
No.3 (斜)	GL-9.3	0.20	杭の位置
	GL-10.5	0.50	杭の位置
	GL-11.8	0.50	杭の位置
	GL-13.1	0.50	杭の位置

本調査では、基礎に関する情報が少ないなか、試掘を行って既設杭を目視確認できたことから、杭長や杭配列調査を目的とした磁気探査の観測孔位置を選定することができた。その結果、磁気探査結果の精度向上が図られ、杭以外と考えられる磁気異常が多く計測され、杭配列推定に困難を要したものの、ある区間で連続して杭配列を把握することができたものと思われる。

以上より、毘沙門橋の橋台には、杭間隔が現在一般的と考えられる杭配置より密に配列されていることが判明した。

## 7. 設計への反映

調査結果を踏まえ、本橋梁の橋台に対する補強対策工法として、表-7に示すアースアンカー工法、地盤改良工法（薬液注入工法）、高耐力マイクロパイル工法を検討対象とした。

表-7 橋台の補強対策工法一覧表

工 法	アースアンカー工法	地盤改良工法（薬液注入）	高耐力マイクロパイル工法
交通規制	必須	可能性あり	不要
騒音/振動	小さい	小さい	小さい
既設構造物への影響	小さい	小さい	小さい
施工範囲	小さい	大きい	小さい
排土量	少ない	少ない	少ない
施工精度	悪い	普通	良い
概算費用	150,000千円	153,000千円	76,000千円
総合評価	△	△	◎

凡例 ◎：優，○：良，△：可，×：不可

アースアンカー工法は現在、永久アンカーとして使われている事例が1件程度と少なく、信頼性に欠けるほか、基礎杭の施工間隔が1m程度であるため、アースアンカーによる補強は施工面・品質面・確実性の面および経済性に劣る。

地盤改良方法（薬液注入工法）は、改良範囲が広範になり、施工規模も多大になるため、経済性に劣る。

したがって、施工性、経済性に優れた高耐力マイクロパイル工法が最適と判断され、橋台の補強対策として、高品質で経済的に有利な対策工法を選定することができた。

## 8. おわりに

本文で紹介した磁気探査法は、地中に埋設されている基礎杭が発生する磁気異常を積極的に測定して、その基礎杭の杭長や配列を推定するものである。

公共事業投資が縮減され、新規の建設が厳しい状況になっているなか、老朽化した橋梁などの道路構造物の多くは、損傷調査を実施して、損傷の程度に応じた補修・補強などを継続的に行い、それにかかる事業をトータルに評価して、長期にわたって使用することが社会的要請になっている。また、経年化した橋梁の基礎は、耐震性に対しても当初の性能を満足することができるか否かも問題となっている。この場合、設計図書等が散逸していることがあるため、基礎の形状・寸法を調査して、橋梁基礎の診断に供することも必要である。

今後ますます増えるであろう、既設橋梁の診断ならびに評価に対し、磁気探査法は有効な手法の一つである。ただし、現在の課題として、調査地周辺に大きな磁力を発生する構造物や、地中で磁場の乱れを引き起こす施設がある場合、測定波形を定量的に判断することが困難になることもある。

そのため、測定および解析のマニュアルをさらに整備して、ニーズに応えることが必要と思われる。

最後に、今後もデータを蓄積し、経済的で、かつ精度の高い手法を確立すること目標として、本調査法の活用をさまざまな場で提案していきたい。

謝辞：本論文を執筆するにあたり、静岡県富士土木事務所の方々には、終始ご協力をいただきました。ここに深謝いたします。

### 参考文献

- 1) 建設省土木研究所他：橋梁基礎構造の形状および損傷調査マニュアル(案)，共同研究報告書，1999
- 2) 建設省土木研究所他：橋梁基礎構造の調査方法の開発に関する共同研究報告書（その1），共同研究報告書，1998
- 3) 建設省土木研究所他：橋梁基礎構造の調査方法の開発に関する共同研究報告書（その2），共同研究報告書，1999
- 4) 土木学会構造工学委員会他：第2回構造物の診断に関するシンポジウム論文集，論文集，2000

(2002.10.04 受付)