

# 橋梁基礎の調査とモニタリング

Investigation and Monitoring of Bridge Foundation

Umemoto Shuji Takaki Takeshi  
 梅本 秀二\* 高木 健\*\*  
 Hanakura Hiroshi Okamoto Takuji  
 花倉 宏司\*\*\* 岡本 卓慈\*\*\*\*

## はじめに

直接基礎、杭基礎、ケーソン基礎に代表される橋梁の基礎は、上部構造から作用する荷重を支持地盤に伝達して橋梁を支持する構造物である。その機能から、必然的に水中や地盤内に位置しており、基礎の劣化状況や変形などの異常を近接目視で直接把握することや地上部におけるセンサ技術、非破壊検査技術、光学的な計測技術をそのまま適用することは困難である。そのため、橋梁の維持管理における点検では、上部工や下部工の気中部が対象となる場合が多く、地中の橋梁基礎は対象となりにくい。

一方で、既設橋梁の耐震性を検討するための基礎の形状調査や健全性調査、既設橋梁に近接して施工する場合の橋

梁基礎および周辺地盤の挙動のモニタリングに対するニーズが高まっている。また、地震や洪水などによって被災した橋梁基礎の健全性を把握することは、橋梁全体の機能性・安全性を評価するうえで重要な課題となっている。

橋梁基礎を調査する場合、水中や地盤内に基礎が位置するという制約の中、目的に応じた調査・モニタリング方法を選定することが必要になる。ここでは、目的別に調査・モニタリングの各方法を紹介するとともに、将来に期待する調査・モニタリング技術について述べる。

## 1. 調査項目および調査方法の概要

橋梁基礎の調査・モニタリングを、形状調査、健全性調

表-1 形状調査項目と方法

調査項目	調査法	ボアホールレーダ	速度検層	磁気探査	インテグリティ試験	ボアホールカメラ	衝撃振動試験
フーチング厚さ					●	●	
基礎の根入れ・杭長		●	●	●	●	●	●
杭種						●	
杭の配列		●		●			
備考		・ボーリング孔利用 ・基礎とボーリング孔の 離隔距離：0.5m未満	・ボーリング孔利用 ・基礎とボーリング孔 の離隔距離 ：0.5～1.0m未満	・対象は鋼管杭 ・PC杭等 ・ボーリング孔利用 ・基礎とボーリング孔の離隔距離 ：0.5～1.5m未満	・非破壊試験	・基礎体内を削孔	・非破壊試験 ・基礎構造の推定

表-2 健全性調査項目と方法

調査項目	調査法	ボアホールカメラ調査	インテグリティ試験	AE法	音波(ソナー)	杭の載荷試験	衝撃振動試験
損傷位置		●	●	●			
損傷状況		●	●	●			●
洗掘					●		(損傷・洗掘の有無)
杭の支持力特性						●	
備考		・基礎体内を削孔	・非破壊試験	・基礎体内を削孔またはボーリング孔利用 ・基礎とボーリング孔の離隔距離：3.0m以内	・水面または水中部で実施 ・基礎周辺地盤の3次元形状データを取得	・杭頭の露出要	・非破壊試験 ・固有振動数の比較

表-3 モニタリング項目と計測器

項目	計測器	傾斜計	沈下計	伸縮計	亀裂変位計	自動追尾型トータルステーション	モーションキャプチャ
基礎周辺地盤の地中変位		●					
基礎周辺地盤の地表面変位				●			●
基礎周辺地盤の沈下			●			●	●
下部工の傾斜		●				●	●
下部工の沈下			●			●	●
上部工・下部工の変位						●	●
上部工・下部工のひび割れ					●		
備考		・地中変位計測時は、ボーリング孔に測定管を設置	・層別沈下計測時は、ボーリング孔に計測器を設置	・測線長は30m程度まで	・容量：±2mm～±5mm	・3次元変位 ・測量用プリズム使用	・3次元変位(同時多点計測) ・専用マーカー使用

\* (株)計測リサーチコンサルタント 事業推進部 部長  
 \*\* 広島大学大学院工学研究科システムサイバネティクス専攻 准教授 博士(工学)  
 \*\*\* (株)計測リサーチコンサルタント 専務取締役  
 \*\*\*\* 〃 代表取締役 社長

キーワード：橋梁基礎、調査、モニタリング

査，モニタリングに大別し，主な調査項目と方法を表-1～3に示す。

橋梁基礎の形状調査方法は，試掘，鉛直・斜めボーリング，採取コアの観察，コア抜きボーリング孔を利用したボアホールカメラによる観察など直接確認する方法がある。ボーリング孔を利用した物理探査手法を用いる場合は，橋梁基礎周辺の水や地盤の影響で磁気や電磁波などの減衰が著しいことから，信頼性を確保するために橋梁基礎に近接して適用している。その他，非破壊試験，振動特性から基礎構造を推定する方法，また，各調査方法の併用などが挙げられる。

橋梁基礎の健全性調査方法は，上記の方法に加え，音波を用いて基礎周辺地盤状況を把握する方法や杭の支持力特性を確認する試験などが挙げられる。

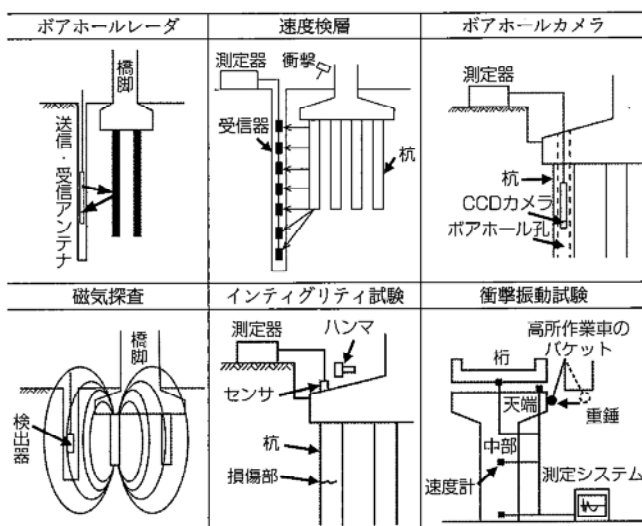
橋梁基礎のモニタリングは，基礎の挙動を直接計測することが望ましいが，基礎に直接計測器を設置できることが少ないため，基礎周辺地盤や下部工あるいは上部工をモニタリング対象とすることが多い。

## 2. 形状調査

表-4に形状調査方法の概略<sup>1)</sup>を示す。

基礎の根入れ・杭長を調査する方法は，比較的種類が多く，実績も多い。ボーリング孔を利用するボアホールレーダ，速度検層，磁気探査は，基礎とボーリング孔の離隔距離を0.5～1.5 m未満にすることによって，基礎の下端を精度良く把握することができる。斜めにボーリング孔を設けて，ボアホールレーダや磁気探査方法を適用すると杭の配列を把握することができる。3次元的な磁界成分が検出可能なホール素子センサを検出器に採用して探査精度の向上を図るとともに，コーン貫入試験器のコーン先端にその検出器を内蔵することで，ボーリング工事を必要としない磁気探査方法も開発されている<sup>2)</sup>。インティグリティ試験は衝撃弾性波法と言われる方法で，フーチングあるいは基礎の上端をハンマで打撃し，高感度振動センサで受信される振動波形を解析して，フーチングや基礎の下端深度を評価する方法であり，最も簡便な方法である。その他，全

表-4 形状調査方法の概略



長にわたってフーチングや基礎の削孔が可能であれば，ボアホールカメラでフーチングや基礎の下端位置，杭の種類や杭の損傷状況も直接確認できる。また，想定した基礎構造モデルの振動モードと衝撃振動試験によって得られた実測値の振動モードを同定することにより，基礎構造モデルを推定することが可能である。

## 3. 健全性調査

表-5に健全性調査方法の概略<sup>1)</sup>を示す。なお，インティグリティ試験，ボアホールカメラおよび衝撃振動試験については，表-4を参照されたい。

### (1) 損傷位置・損傷状況

基礎自体の損傷位置・損傷状況の調査は，基礎が露出できる箇所については，目視調査やコアボーリングによって採取したコアを観察する方法が確実である。また，コアボーリング孔を利用すると，ボアホールカメラによる内部の状況調査が可能である。鋼管杭のような中空部のある既製杭に挿入式傾斜計を挿入し，杭の変形を計測する場合もある。非破壊検査方法としては，先述したインティグリティ試験や表-5に示すAE法が挙げられ，鉛直荷重により構造物の損傷部から誘発された二次起因のAEを利用した調査手法（二次AE法）もある<sup>3)</sup>。

### (2) 洗掘

洗掘調査方法は，ラジコンボートに音響測深器を搭載して，その位置と水深から河床などの3次元立体図を作成する方法，上部工からカラーイメージングソナー等を水中まで降ろして橋脚周辺の地盤の形状を計測する方法などが用いられる。最近では，水中3Dスキャナと呼ばれる駆動部を持つソナーやそのソナーを搭載したROV（Remotely operated vehicle）を用いて，より高精度かつ効率的に水中部の橋梁基礎および周辺地盤の3次元形状データを取得している（図-1）。さらには，グリーンレーザを用いたALB（航空機レーザ測深機）計測により，河床などの3次元地形データを空から広範囲かつ短時間で取得する技術も実現している<sup>4)</sup>。また，直接水深を計測するのではな

表-5 健全性調査方法の概略

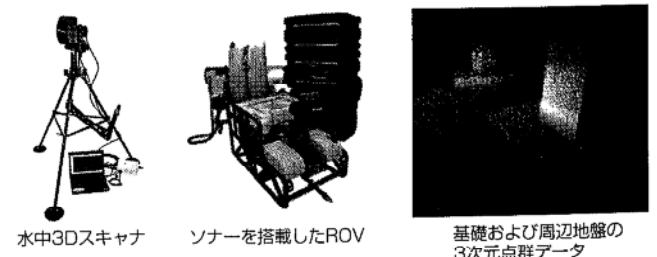
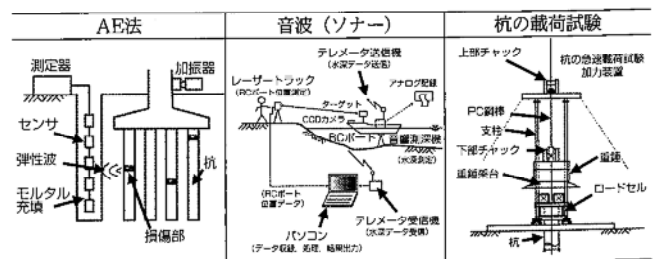


図-1 水中3DスキャナおよびROV

く、洗掘に伴って発生する橋脚の傾斜や振動モードの変化から洗掘を評価する場合もある。

#### 4. 橋梁基礎のモニタリング

橋梁基礎の変状は、拘束条件の変化や設計想定外の外力が作用することにより発生する。その多くは、基礎周辺地盤の変状に伴うものであり、橋梁全体に影響を及ぼすことも少なくない。基礎周辺地盤の変状の要因としては、地震や洪水など自然災害によるもの、既設構造物に近接して施工されるために生じる人為的な要因などが挙げられるが、ここでは、特に都市土木などで頻りに課題となる近接施工に伴う橋梁基礎のモニタリングについて述べる。

近接施工とされる条件は、鉄道関係、道路関係そして管路関係で定めている各指針・要領で規定されている。条件に当てはまる場合、まず、近接程度の判定により影響範囲を設定し、既設構造物の安全性の照査、対策工法を検討する。必要に応じて対策工を実施し、施工時はモニタリングにより既設構造物の挙動を監視する。近接工事の対象となるのは、開削工事・基礎工事・トンネル工事・盛土・切土工事・補助工法（地盤改良等）等が挙げられる。これら近接工事における近接度の判定は、既設構造物から判定する方法と新設構造物から判定する方法がある。

##### a) 既設構造物からの近接程度の判定方法

新設構造物施工時の既設構造物周辺地盤の地中応力分布、支持力機構の変化、すなわち地盤の緩みに着目し、周辺地盤、既設構造物の安定、破壊の危険性、変位量などに基づき判定する方法。

##### b) 新設構造物からの近接程度の判定方法

新設構造物の施工に伴って生じる周辺地盤の変位、変形を引き起こす原因別および施工段階ごとに近接程度の範囲を判定する方法。

これにより近接程度を区分し、対策の内容を明確にする。その例を表-6<sup>5)</sup>に示す。施工に際しては、周辺地盤と対象構造物の変形を予測しなければならないが、地盤と対象構造物の相互作用の問題、変形解析における地盤特性・解析手法の問題から予測精度も自ずと限界がある。こうした将来予測における不確定要因を解決するのがモニタリングである。モニタリングを実施する場合、基礎構造物

表-6 近接度の区分と対策の内容

近接程度の区分		対策の内容
区分	内容	
一般範囲	新設構造物の施工により既設構造物に対し、変位や変形等の影響が及ばないと考えられる範囲。	一般に特別な対策を必要としない。
要注意範囲	新設構造物の施工により既設構造物に対し、通常は変位や変形等の有害な影響はないとしてよいが、まれに影響があると考えられる範囲。	新設構造物の施工法による対策を原則として実施すると共に、既設構造物の変位・変形量を推定し許容値との比較を行う等、影響度を検討したうえで、状況に応じてその他の対策工を実施する。また、工事を安全に進めるため、対象となる既設構造物および周辺地盤や仮設構造物を含む新設構造物の挙動を計測して管理する。
要対策範囲	新設構造物の施工により既設構造物に対し、変位や変形等の有害な影響が及ぶと考えられる範囲。	新設構造物の施工法による対策を必ず実施すると共に、既設構造物の変位・変形量を推定し許容値との比較を行う等、影響度を検討したうえで、原則としてその他の対策工を実施する。また、工事を安全に進めるため、対象となる既設構造物および周辺地盤や仮設構造物を含む新設構造物の挙動を計測して管理する。

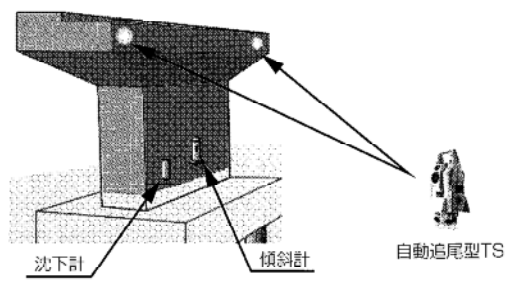


図-2 計測器の配置例

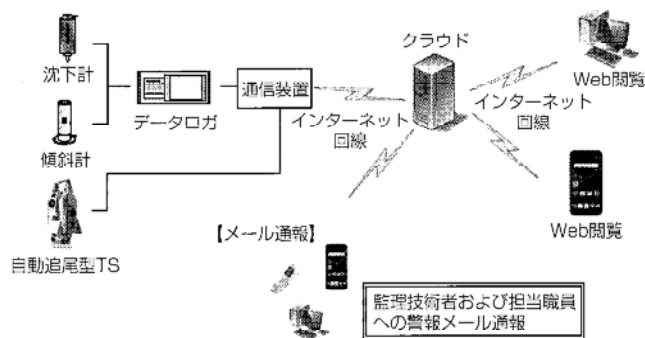


図-3 モニタリングシステム例

自体に計測器を設置することが困難である場合が多いため、基礎の変状に起因する基礎周辺地盤の変位や沈下、あるいは基礎の変状に起因する下部工や上部工の沈下・傾斜等をモニタリング項目にすることが少なくない。モニタリングにおける橋梁の機能性・安全性の評価は、限界値、許容値、設計計算値等から設定する管理値と得られる計測データを比較して行う。

下部工をモニタリング対象とした計測器の配置例を図-2に、計測システム例を図-3に示す。

最近では、通信機能を有するデータロガからクラウドに計測データをアップロードして、Web上で管理するシステムが採用されることも多くなっている。また、計測器、ロガー、通信機能が一体となった無線センサやMEMS (Micro Electro Mechanical Systems) を取り入れた計測システムも導入され始めている。

#### 5. 基礎の状態を「見える化」する調査技術への期待

国内の莫大な数の橋梁を維持管理するには、多大な時間と費用が必要となる。そのため、他のインフラ構造物と同様に、安価で効率よく橋梁基礎の状態を把握し、スクリーニングする技術が望まれている。

例えば、人間の体内を撮影して病気を発見するMRIやCTスキャンのように、地中の橋梁基礎の3次元形状や基礎内部の状態を把握できる可能性のある技術として音響トモグラフィがある(図-4)<sup>6)</sup>。音響トモグラフィは、計測精度1m以下で地盤の地質構造や特性を可視化する地盤探査法であり、潜水艦のソナー技術などに用いられている擬似ランダム波で50~100mの広範囲の調査が可能な地中を「見える化」する技術である。さらに、音響トモグラフィの技術は既に構造物設備診断への展開が図られている<sup>7)</sup>。この技術の更なる開発が進めば、地盤の見える化だけでなく、橋梁基礎のような地中構造物の3次元形状や状

態までも見える化できるようになると考えられる。

また、構造物に作用する応力を見える化する“ひずみ可視化シート”と呼ばれる新たなひずみ計測技術が開発されている(図-5)<sup>8)</sup>。モアレ縞の原理を用いたセンサであり、電源が不要で、目視でひずみの値を確認できる。基礎の変状に起因して下部工や上部工に発生する応力をモニタリングするセンサとして有効である。

新設の基礎であれば、図-6に示すようなMEMSセン

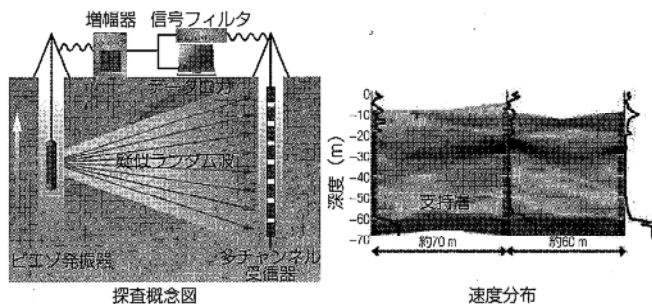


図-4 音響トモグラフィの探査概念と探査結果例

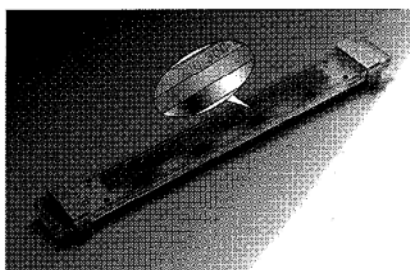


図-5 ひずみ可視化シート

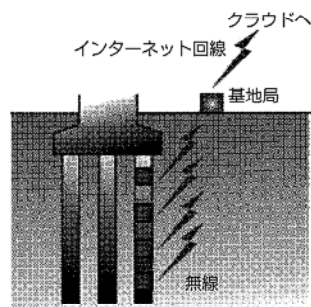


図-6 MEMSセンサによるモニタリング技術のイメージ



写真-1 RFIDセンサ

サを用いた安価で信頼性の高いモニタリング技術もまた、基礎の状態を“見える化”する技術となり得る。MEMSセンサの性能の向上、超省電力化が進歩することによって長期間のモニタリングが期待できる。写真-1に示すRFIDセンサは、計測時に無線で電源を供給するため、RFIDタグを計測可能な地上部(橋脚内部)に配置することで基礎内部の応力状態や腐食環境を把握できるモニタリング技術になる<sup>9)</sup>。これらのセンシング技術とIoTにおける通信技術が融合することにより、より効率的なモニタリングが可能になる。

### おわりに

橋梁基礎の状態を把握することは、地上部にある構造物と比べて非常に難しい。しかし、橋梁全体の健全性は、人間の眼では見えない基礎の状態が把握され、総合的に検討・照査されなければならない。今後、橋梁基礎の高齢化が進むにつれて、橋梁基礎の調査・モニタリングのニーズは、高まってくることが予想される。筆者らも、橋梁基礎の調査・モニタリング技術の更なる発展に寄与していきたい。

### 〔参考文献〕

- 1) 福井次郎, 寿上隆司: 橋梁基礎における維持管理の現状と課題, 地質と調査, pp. 10~16 (1999.6)
- 2) 西岡英俊, 羽矢 洋: ホール素子センサーを用いた杭基礎の根入れ調査法, 基礎工, Vol. 41, No. 9, p. 67 (2013.9)
- 3) 中西康博, 塩谷智基, 羅 休, 羽矢 洋, 稲葉智明: AE法による橋梁基礎の損傷調査, 既設構造物の耐震補強に関するシンポジウム 論文集, pp. 31~38 (2002.11)
- 4) 大鋸朋生, 金田真一, 戸村健太郎, 岡崎克俊: 世界最小の航空レーザー測深機 (ALB) による高密度計測と陸上計測の実験と利活用場面の想定, 先端測量技術 No. 107, pp. 73~85 (2015.11)
- 5) 近接施工技術総覧 第3章設計・施工計画, 近接施工技術総覧編集委員会, 近接施工技術総覧, p. 60 (1997.3)
- 6) 榊原淳一: 音響トモグラフィを用いた高精度地盤探査, 土と基礎, Vol. 55, No. 11, pp. 17~19 (2007.11)
- 7) 榊原淳一, 田中真人, 田近久和: 音響トモグラフィを用いた構造物設備診断技術, JFE技報, No. 11, pp. 50~55 (2006.4)
- 8) 梅本秀二, 高木 健ほか: インフラ構造物に作用する応力見える化, ロボティクス・メカトロニクス講演会2017 論文集 1P1-B04 (2017.5)
- 9) 江里口玲, 小川彰一, 大竹淳一郎, 佐藤達三: RFIDを用いたひずみ計測システムの性能と適用事例, プレストレストコンクリート技術協会第19回シンポジウム論文集, pp. 253~256 (2010.10)