

橋脚の健全度モニタリングが可能な 新しい洗掘検知装置の開発



櫻 健典*



鈴木 修**

河川増水時に洗掘されるおそれのある橋脚について、東日本旅客鉄道株式会社（以下「JR東日本」）では洗掘検知装置により橋脚の傾斜角を常時監視し、一定以上橋脚が傾斜すると列車の抑止や速度規制といった列車運転規制を行っている。しかし、橋脚が傾斜に至らぬまま徐々に洗掘が進行し、ある時点で急に傾斜が進行する場合もあるため、橋脚の健全度を常時把握することが望ましい。そこで、本研究開発では傾斜検知機能に加え、列車振動などを基に橋脚の健全度をモニタリングする機能を付加した、新しい洗掘検知装置の開発を行っている。このうち、傾斜検知機能については検証を完了し、現在は、列車振動や河川増水時の微動を利用した健全度評価手法について、実測データを基に検討を進めている。なお、本研究成果を基とした新しい洗掘検知装置の実用先行システムが、2013年度以降導入予定である。

●キーワード：洗掘、列車振動、モニタリング、センサ

1. はじめに

橋脚の洗掘災害は、河川増水により橋脚の基礎部分の土砂などが流出し、最終的に橋脚が傾斜に至るもので、目視検査ではその予兆を発見するのが難しい災害の一つである。また、ひとたび発生すれば、重大な事故や輸送障害につながる。そのため、JR東日本では、洗掘対策として根固め工施工などのハード対策に加え、河川水位を監視する水位計や橋脚のわずかな傾斜を検知する傾斜検知型洗掘検知装置による計測に基づいた列車運転規制といったソフト対策を行っている。

洗掘災害は、災害が発生すると、速やかに列車を抑止しても橋脚の修繕のため長期間の列車運休が発生するとともに、多額の費用を要することとなる。洗掘は、橋脚が傾斜に至らぬまま徐々に進行し、ある時点で急に傾斜が進行する場合もあることから、洗掘の初期状態を検出できれば、安全性を向上できるだけでなく安定性の向上やコストダウンでもできると考えられる。そのためには、洗掘や河床低下に対する橋脚の健全度を常に把握しておくことが望まれる。

現行の洗掘検知装置は、橋脚の傾斜があるしきい値を超えた場合に警報を発令する機能しか備えていない¹⁾。そのため、橋脚の健全度を評価するためには、橋脚を強制振動させ、発生する応答波形から得られる固有振動数を用いる方法（以下「衝撃振動試験」²⁾）が一般的に行われている。これは、洗掘などにより橋脚の健全度が低下すると、固有振動数が低下することを利用している。しかし、橋脚を強制振動するには高所で30kg程度の重錘を扱う必要があり、常時モニタリングに活用できる手法ではない。

そこで、本研究開発では、従来の傾斜検知機能に加え、

列車振動や増水時の微動を利用して橋脚の健全度をモニタリングする機能を付加した新しい洗掘検知装置の開発を行った。このうち、傾斜検知機能については検証を完了し、現在は、列車振動や河川増水時の微動を利用した健全度評価手法について、実測データを基に検討を進めている。本稿では、これまでの開発成果及び導入に向けた取組みについて報告する。

2. 開発の背景と概要

2.1 現行の洗掘検知装置の概要と課題

現在、JR東日本では傾斜検知型の洗掘検知装置（図1）を、洗掘のおそれのある橋脚に設置している。これは、橋脚の橋軸方向（レールと平行な向き）および橋軸直角方向（レールと直行する向き）の傾斜角を常時計測し、傾斜角が一定のしきい値を超え、あらかじめ定めた時間（現行120秒間）以上超過し続けた場合、警報を発令するしくみとなっている¹⁾。傾斜角のしきい値は軌道の整備基準値から算出され、速度規制値及び運転中止値の2種類である。しきい値は1°未満であることが多いため、1/100°より小さな分解能を有するセンサが用いられている。このセンサは、気泡型水準器と同様の動

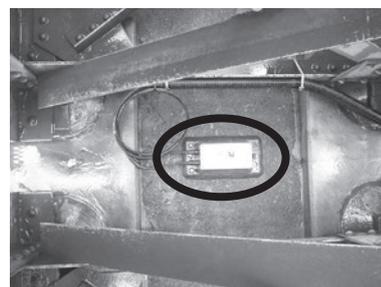


図1 現行の洗掘検知装置

作原理で、気泡の移動を本体電極ピン間の電圧変化として出力する³⁾。本装置が2000年度に実用化されたことにより洗掘災害に対する保安度の向上が実現した。

しかし、このセンサは感知部が故障しやすいという課題がある。また、センサから出力される傾斜角の値を端末上で確認できないこと、落雷による誤作動が発生することなど、システムとしての課題もある。さらに、前述のように橋脚の健全度をモニタリングできないという、機能面での課題もある。そのため、さらなる改良を施した新しい洗掘検知装置の開発が望まれていた。

2.2 新しい洗掘検知装置のコンセプト

本研究開発では、現行の洗掘検知装置と同様の、橋脚の傾斜角を計測して一定のしきい値を超過した際に警報を発令する機能に加え、通常時や増水時に橋脚の健全度評価をする機能を追加することを目標とした。それぞれの機能について、以下の考え方により検討を進めた。なお、健全度評価については、増水時とそれ以外の通常時に分けて検討した。

(1) 傾斜検知

現行と同様に、橋脚の傾斜が一定のしきい値を超過すると警報を発令することとした。また、警報発令前であっても傾斜の進行を把握しやすくするため、傾斜角の値を端末で表示するようシステムの仕様を検討することにした。

(2) 通常時の橋脚の健全度評価

現在行われている橋脚の健全度評価手法として衝撃振動試験があるが、既述のとおり常時モニタリングには活用できない。しかし、重錘に代えて列車通過時の振動を起振源として使うことができれば、衝撃振動試験よりも容易に、かつ継続して健全度評価ができる可能性がある。

列車通過時の変位を用いた健全度評価は、日本国有鉄道時代にも試みられていた⁴⁾。変位が大きいことはすなわち橋脚が揺れやすいことであり、橋脚の健全度が低下していると考えられる。その一方で、列車振動は、機関車や電車など車両の種類や、乗車率、速度などに応じたばらつきが大きい。そのため、各々の振幅を基に橋脚の健全度を正確

に評価することは難しく、この手法は現在では行われなくなっている。

しかし、現在は常時モニタリングにより連続的に多くのデータを取得することが技術的に可能である。従って、ばらつきの大きいデータであっても統計的に処理し、その値の大きな変化の有無から健全度評価ができる可能性がある。そこで、本研究では列車通過時のセンサの計測値から得られる変位を統計的に処理し、健全度を評価することをめざした。

(3) 増水時の橋脚の健全度評価

増水により列車の運転を中止した際に、運転再開が可能かを判断するための橋脚健全度の評価には、上記の列車通過時の変位を用いることができない。そのため、増水時にはセンサで常時計測される微動の変化から健全度を評価することをめざした。

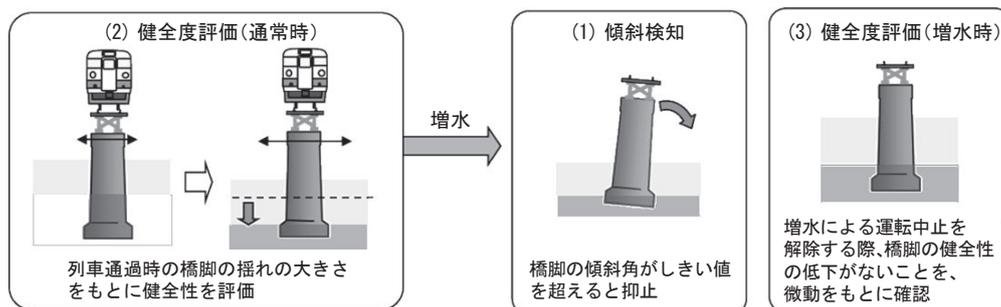
以上をまとめ、本研究開発で検討するシステムのコンセプトを図2に示す。さらに、導入効果として、単一のセンサにより橋脚の傾斜検知と健全度評価という複数の機能を実現することで、設置費用のみならずメンテナンスコストを含めたトータルでのコストダウンが期待できる。

3. センサの選定

前章のコンセプトを満たすセンサについて検討した。新しい洗掘検知装置は傾斜角と列車通過時の振動を同時に計測できる必要がある。従来の洗掘検知装置に用いられている気泡式センサは故障が多いほか、列車通過時の振動計測が困難である。そこで、本研究開発で使用するセンサの仕様について、以下の項目に関して検討した⁵⁾。

(1) 傾斜検知性能

傾斜角の検知については、列車運行に直結するため高い安定性が求められ、温度特性に優れていることや耐ノイズ性（スパイクノイズなど）が高いこと、角度に変換した際に高い分解能を有することが必要である。また、傾斜センサに限らず、加速度センサであっても、橋脚が傾斜し水平方向に設置されているセンサが傾くとその傾斜 (θ) に応じた加速度 ($G\sin\theta$)



を検知するため、これを基に傾斜角を求めることができる。そのため、傾斜センサと加速度センサの双方を検討対象とした。

(2) 計測レンジ

列車通過時の振動や増水時の微動計測が可能なことに加えて、将来的には地震発生時についても健全度評価を可能にするため、地震による加速度を計測でき、一方で自己ノイズは極力小さいことが望ましい。

(3) 振動数特性

列車通過時に高い振動数成分が多いことによって正確な波形が得られなくなることを防ぐため、ある程度広帯域で計測できる性能が必要である。

既製のセンサからこれらの項目を満たす2機種に絞り込んだうえで実橋のように試験設置し、最終的に使用するセンサを選定した。

4. フィールド試験の概要と結果

新しい洗掘検知装置を開発するにあたり、実際のデータを基にした検討を行うため、実橋脚にセンサを設置しデータの収集を行った。収集したデータを基に、橋脚傾斜角の計測精度評価や橋脚健全度の評価手法の検討を行った。

4.1 センサの試験設置

試験を実施した橋りょうは表1および図3のとおりである。A橋1P（起点方から1本目の橋脚）、B橋1Pおよび2Pの計3橋脚を対象とした。各橋脚の天端に、前章の検討で絞り込んだ2機種のセンサ（以下センサ①、センサ②とする）と、現行の洗掘検知装置と同じ気泡式センサを設置し、計測を実施した。また、A橋においてはリング式変位計（図4）を4日間 にわたり設置した。B橋においては既設の水位計の水位データとの比較が可能である。

4.2 橋脚傾斜角の評価

橋脚の傾斜角は、洗掘発生時でなくとも、日常的にごくわ

ずかではあるが変動しているといわれている。これは、気温変化などにより桁に変位が発生する際、支承の摩擦係数（可動不良の度合い）が相違することで、橋脚に偏心した力がかかる結果生じるものであるとされている⁶⁾。そこで、センサによって計測された橋脚の傾斜角の精度を検証するため、この日常的な傾斜角の変化がセンサにより正しく捉えられるかを検証することにした。

A橋においてセンサによって計測された加速度の大きさから橋軸方向の傾斜角を算出し、リング式変位計により計測された変位から算出した傾斜角との比較を行った（図5）。なお、データのサンプリング間隔は30分である。この結果から、センサ①による計測値がセンサ②に比べより正確な値を示していることがわかる。また、センサ①は現行の洗掘検知装置で用いられている気泡式センサと同等の精度であることもわかる。

なお、センサによる計測は約1年間にわたってA橋、B橋で実施しているが、気泡式センサとの比較においてセンサ②に比べセンサ①は良好な計測を行えることを確認した。

表1 試験を実施した橋りょうの諸元

諸元項目	A橋	B橋
施工年	1967年	1960年
上部工(支間)	22.3m	19.2m
(桁種別)	上路鋼鈑桁	上路鋼鈑桁
下部工(材質)	鉄筋コンクリート	鉄筋コンクリート
(形式)	杭基礎	直接基礎
(高さ)	7m	8m
計測期間	2011年9月～現在	2012年10月～現在



図3 試験を行った橋りょう（左/A橋、右/B橋）

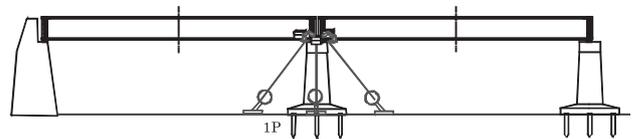


図4 リング式変位計の設置

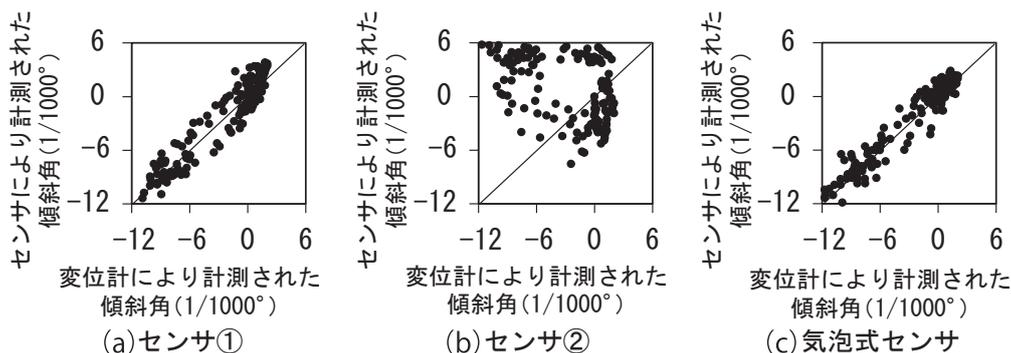


図5 橋脚傾斜角の評価

そこで、新しい洗掘検知装置にはセンサ①を使用することとし、以降の検討は、センサ①の計測結果を用いて実施した。

4.3 橋脚健全度の評価

橋脚健全度の評価は2章で述べたように、通常時であれば列車通過時の振動、増水時であれば微動を基に判断する。このためには、センサにより計測された波形から目的とする波形を抽出したうえで、評価基準を適用する必要がある。そこで、波形の処理方法と評価基準のそれぞれについて、検討を行った。

4.3.1 波形処理方法の検討

センサにより計測された加速度波形には、列車通過時の振動、地震動、それ以外の微動が混在している。そのため、健全度評価のためには、センサで得られた波形をそれぞれに分別する必要がある。

そこで、波形の自動判別アルゴリズムを検討し、その適用性について実際の計測データを基に検証した⁷⁾。なお、波形の判別フローは、加速度RMS値による判別と振動数比による判別の2つのステップから成る(図6)。それぞれの判別に必要なしきい値は橋脚ごとに定めることを考えている。

(1) 加速度RMS値による判別

微動を地震動・列車通過時の振動と区別するための指標として、加速度RMS値(二乗平均平方根。振幅の大きさをあらわす)を用い、列車振動や地震動はRMS値が大きく、微動はRMS値が小さいことを基に、微動とそれ以外の波形を分別することにした。

波形の一例として、B橋1Pで計測された加速度波形を図7に示す。微動は列車振動、地震動の振幅よりも明らかに小さく、判別が可能である。

(2) 振動数比による判別

列車振動のスペクトルは車両の軸距(車軸間の距離)の影響などによる高い振動数帯の成分が多いのに対し、地震動のスペクトルは地盤の特性による低い振動数帯の成分が多い。一例として、B橋1Pにおける計測結果の例を図8に示すが、

列車振動と地震動を比較すると主要なスペクトルの振動数帯が明らかに異なっていることがわかる。

そこで、スペクトル全体の中で、低振動数成分がどの程度含まれるかを振動数比 q として以下のように定義し、列車振動と地震動との判別に用いることにした。

$$q = \frac{I_L(\omega)}{I(\omega)}$$

ここで、 $I(\omega)$ は全振動数帯のパワースペクトルを累積したもの

$I_L(\omega)$ は低振動数帯のパワースペクトルのみを累積したもの

である。

振動数比が小さいものを列車振動、大きいものを地震動として判別することが可能である。

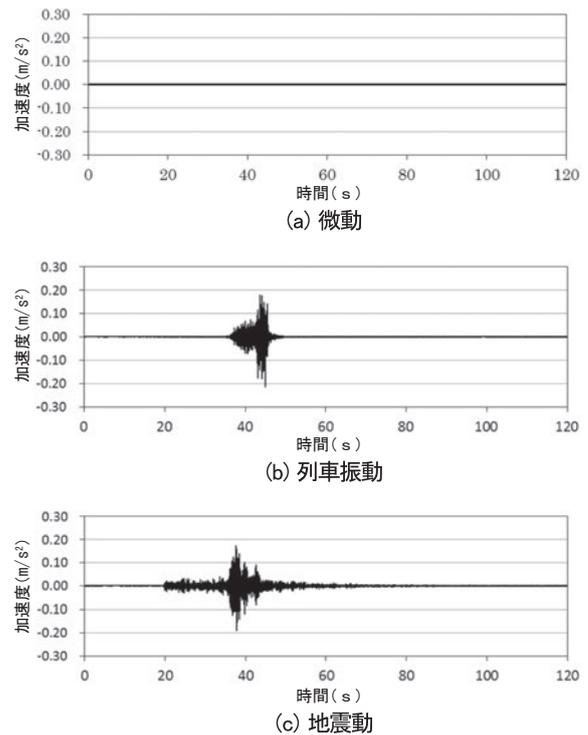


図7 各種波形の例

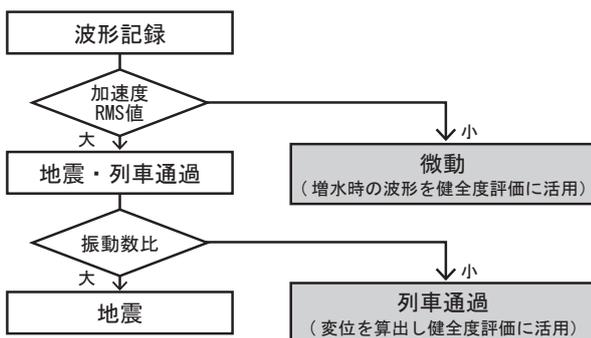


図6 波形の自動判別フロー

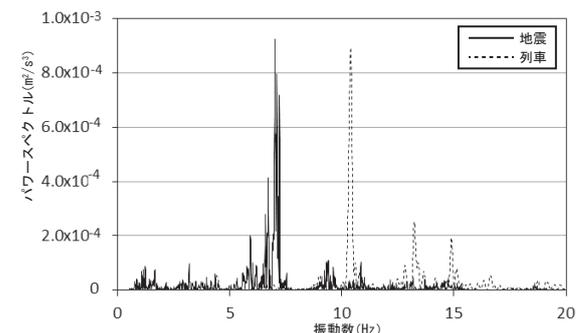


図8 列車通過時と地震時のスペクトルの例

4.3.2 通常時の橋脚の健全度評価

通常時の橋脚の健全度評価は列車通過時の振動を基に行うが、2章で述べたように、(1)列車通過時のセンサの計測値から変位を算出し、(2)変位を統計的に処理することで健全度評価を行う、という手順になる。そこで、それぞれについて実際の計測データを基に検討を行った。

(1) 列車通過時の変位の算出

列車通過時の変位の推定方法として、以下の2つの手法を検討した。

【手法①】

橋脚が一点を中心に回転運動していると仮定し、センサから算出される傾斜角を基に変位を算出する(図9)。

【手法②】

不規則振動理論⁸⁾(変位 $\approx \gamma \times$ 加速度、に近似する考え方)により変位を算出する。

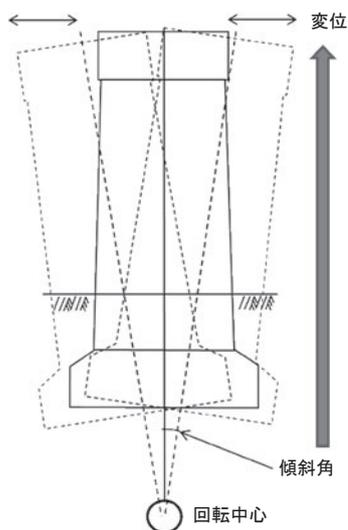


図9 傾斜角からの変位算出

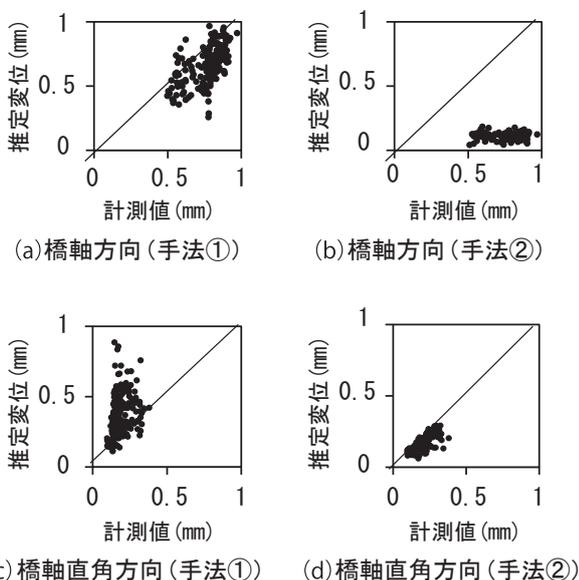


図10 センサの計測結果から推定した変位とリング式変位計により計測された変位との関係

これらの手法を用いて、A橋の列車通過時の変位について、センサの計測結果から算出された推定変位とリング式変位計の計測結果を比較したものを図10に示す。なお、データは計測期間中(4日間)の通過列車ごとにプロットしている。この結果、橋軸方向では手法①、橋軸直角方向では手法②が適していることが分かった。

(2) 健全度評価

センサの計測結果から推定したB橋IPの列車通過時の最大変位について、1日ごとにその平均値をプロットしたものを(日平均変位)を図11に示す。軌道整備が実施された日に橋軸直角方向の値が大きく変化しているが、ほかの期間については橋脚の健全性を含め橋りょう周辺に変化は無く、日平均変位の値にも大きな変化はみられなかった。

このような計測を長期間継続して行うことで、日平均変位の値が大きく変化した際は橋脚の健全性に何らかの変化があったと推定できる可能性があり、今後も引き続きデータを収集して検証する予定である。

4.3.3 増水時の橋脚の健全度評価

河川増水時の微動から橋脚の健全度が評価できれば、水位規制により運転中止となった際の運転再開判断に活用できる可能性がある。そこで、計測データから抽出された微動から、特に河川増水時の微動振幅の変化について検討した。一例として、図12に、B橋において台風の影響により増水した際の微動振幅(20秒間の加速度RMS値)の変化を示す。

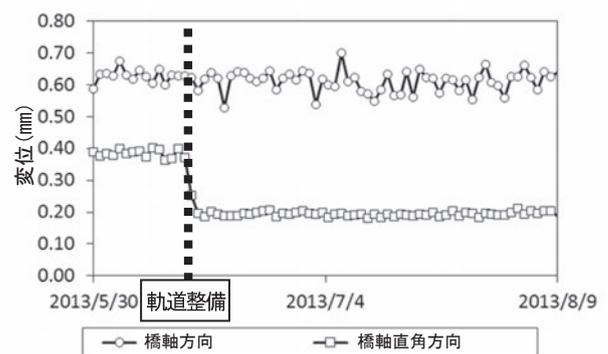


図11 列車通過時の最大変位(日平均)の変化

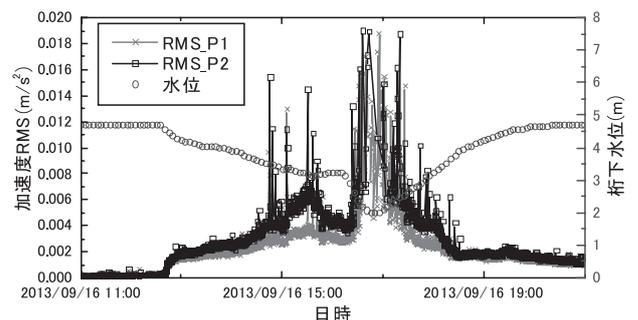


図12 増水時の微動振幅の変化

図12から、桁下水位の低下、すなわち河川水位の上昇に応じて微動振幅が大きくなることから分かる。水位と微動振幅の大きさの関係などから橋脚の健全度を推定できる可能性があるが、センサを試験設置した橋りょうにおける増水事例が不足しており現時点では詳細な検討は難しいため、今後も引き続き計測を続ける予定である。

5. 実用化に向けたシステム仕様の検討

これまでの研究開発の結果、現在までの検証結果は表1に示した、上部工が鋼構造で比較的軽く、また下部工が高さの低いRC造の橋りょうに限られるものの、列車通過時の振動による変位などをセンサにより継続的に測定することで、現行と同等の傾斜検知機能に加えて橋脚の健全性を評価できる洗掘検知装置が実用化可能であることが示された。

そこで、2.1項で述べた現行の洗掘検知装置の課題も踏まえたうえで、実用化に向けたシステムの仕様を検討した。橋脚上に設置する装置（以下「センサボックス」）はフィールド試験の結果が良好であったセンサ①を橋軸方向及び橋軸直角方向に配している（図13）。また、雷などによる電気ノイズ

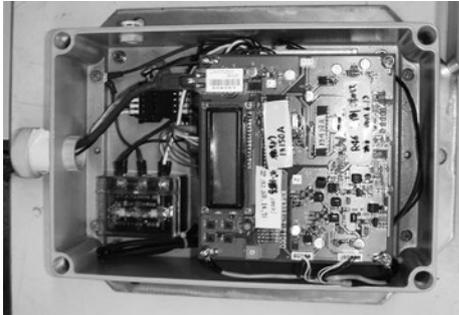


図13 試作したシステムのセンサボックス

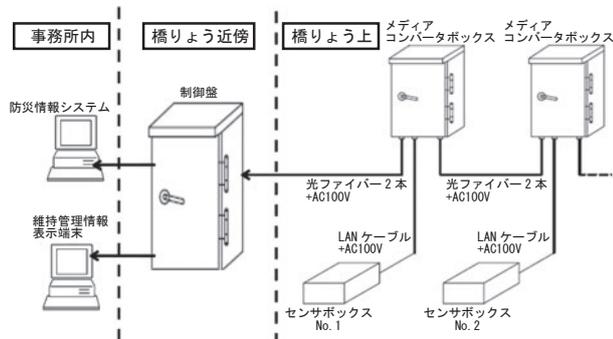


図14 実用先行システムの概要

表2 洗掘検知装置の機能比較

機能	現行の洗掘検知装置	新しい洗掘検知装置
運転規制 (PreDAS表示)	可能	可能
傾斜角の表示	不可能	可能
列車振動による健全度評価	不可能	可能 (評価基準は検討中)
増水時の健全度評価	不可能	可能 (評価基準は検討中)

の影響を最小限に抑えるため、センサボックスの近傍にメディアコンバータボックスを設置して電気信号を光信号に変換し、制御盤（橋りょう付近に設置しデータの処理を行う装置）までを光ファイバー回線で接続することとした。1つの制御盤に対し、センサボックスは最大7台接続可能とした。

本システムは、従来と同様に防災情報システム (PreDAS) に接続し、傾斜角が一定のしきい値を120秒間継続して超えた場合に警報を発令する。一方、今回新たに追加した橋脚健全度の表示機能や、PreDASには出力できない傾斜角の値の表示機能については、設備の維持管理を担当する現業機関向けに維持管理情報表示端末を別途用意して表示することとした（図14）。現行の洗掘検知装置との機能比較を表2に示す。

6. 今後の展開

本研究開発の成果をもとに、先行導入として新しい洗掘検知装置を2013年度中に在来線4橋りょう計8橋脚に設置し、使用開始する予定である。今後は、先行導入される装置の稼働実績を踏まえつつ、最終的な量産システムの仕様を検討する予定である。

また、これまでに検証を行っていない形態の橋りょうについても本研究開発の成果を適用可能であるか検証を進めており、その結果を踏まえつつ現行の洗掘検知装置との置換えを進めていきたいと考えている。橋脚健全度の評価基準などについても引き続き検討を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 増井洋介, 鈴木修; 橋りょう下部工健全度評価システムの開発, JR EAST Technical Review No.26 pp.63-66, 2009.2
- 2) 西村昭彦, 棚村史郎; 既設橋梁橋脚の健全度判定法に関する研究, 鉄道総研報告, Vol.3, No.8, pp.41-49, 1989.8
- 3) 小林範俊, 島村誠; 橋脚洗掘モニタリング手法の開発, JR EAST Technical Review No.3 pp.49-52, 2003.5
- 4) 日本国有鉄道; 建造物検査標準解説, (社)日本鉄道施設協会, 1966
- 5) 杉崎光一, 阿部雅人, 奥水聡; 慣性計測を用いた鉄道橋モニタリングのためのセンサ性能評価, 土木学会論文集 A1, Vol.69, No.2, 2013
- 6) 堀合聡, 杉崎光一, 阿部雅人, 阿部允, 増井洋介; 変位に着目した鋼鉄道橋のモニタリングに関する基礎的研究, 鋼構造年次報告論文集, 2010.11
- 7) 鈴木修, 杉崎光一, 阿部雅人, 島村誠; 慣性センサを用いた洗掘検知装置の開発, 第29回センサ・マイクロマシンと応用システムシンポジウム, 2012
- 8) 阿部雅人, 藤野陽三; 不規則振動理論を援用した加速度記録からの地震時最大応答変位のリアルタイム推定, 土木学会論文集 A, Vol. 65, No.1, 2009.2