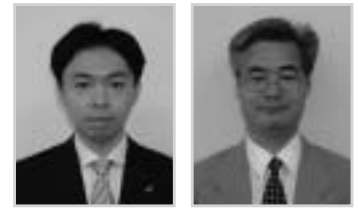


## 橋脚洗掘モニタリング手法の開発



小林 範俊\* 島村 誠\*

洗掘により橋脚が傾斜し、安全性が脅かされることがある。このような災害の発生を捉え、列車の安全を確保するため、傾斜型洗掘検知装置を開発した。この装置は洗掘による橋脚の傾斜を測定し、傾斜角度が規制値を超えると、輸送指令室等に警報が発令される。現在までに管内150箇所弱の橋りょうに設置され、列車の安全運行に役立っている。また、本装置の機能を高めるため、傾斜角度の時系列データから統計的手法により傾斜の進行を予測し、危険な状態になる前に確実に警報を発するための研究も行なっており、簡単な予測モデルにより傾斜角度の予測が可能になることが分かった。

キーワード：洗掘、検知装置、防災情報システム、時系列解析

### 1 はじめに

河川を横断する橋りょうでは、増水時に発生する洗掘のために橋脚が傾斜するなどの災害が発生して列車の安全運行が脅かされることがある。このような災害に対して、JR東日本ではハード対策として洗掘の発生を防ぐ根固工を施工したり、ソフト対策として河川水位から洗掘深さを推定し、水位が上昇した場合に列車の運転を規制するなどして、列車運行の安全性を確保してきた。

一方、運転規制をより合理的に実施するため洗掘の発生を直接検知する装置の開発を進めてきたが、濁流の中で川底の深さを測定する困難さに技術的なネックがあり、なかなか満足に実用化できるレベルに達しなかった。この問題点を解決するため、洗掘そのものではなく洗掘によって起こる橋脚の微小な傾斜を検知して警報を発する傾斜型洗掘検知装置の開発を進めてきた。

### 2 傾斜型洗掘検知装置

傾斜型洗掘検知装置は、橋脚天端に設置した傾斜センサーで橋脚の傾斜角を常時測定し、その値がある一定値を超えると異常と判断する(図1)。傾斜センサーは気泡型水準器と同様の動作原理で、気泡の移動を本体電極間の電圧変化として出力する。傾斜角の測定精度は $1 \times 10^{-3}$ 度以上とし、測定範囲は $\pm 5 \times 10^{-1}$ 度の範囲内で直線性を確保できるものとした。傾



図1：傾斜型洗掘検知装置

斜センサーは直交する2軸に対して1個ずつ対応しており、図1及び本文中においてX軸とは河川方向(線路直角方向)、Y軸とは線路方向を表している。また、±の符号についてはX軸については下流側に傾くとプラス、Y軸については右岸側に傾くとプ

ラスの値が出力される。その他、図1b)に示す通り、装置内には傾斜センサーだけでなく温度センサーも取り付けられている。

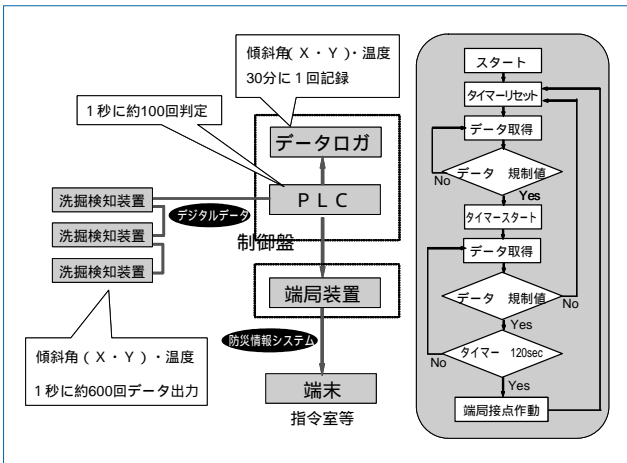


図2：データ処理フロー

本装置のデータ処理フローを図2に示す。測定されたX・Y方向2成分の傾斜角と温度は装置内で直ちにデジタル変換される。変換されたデータは橋台付近に設置されたデータ処理用の制御盤にケーブル経由で伝送される。制御盤内では、各橋脚の測定値が予め設定された規制値を超えているかどうか判別される。傾斜角度が規制値以上になった場合、内蔵のタイマーが作動する。タイマーがONになった後もデータ判別を行ない続け、タイマーが120秒経過しないうちに傾斜角度が再び規制値未満になればタイマーは0にリセットされる。これは、列車振動等による橋脚の強制振動で警報が発せられるのを防止するためである。

計測されたデータは一定間隔で制御盤内に保存され、また1台の制御盤には検知装置を最大16台まで接続できる。

JR東日本では自然災害から列車運行の安全を確保するため、線路沿線に雨量計や風速計などの防災用気象観測機器を設置し、これらの機器からの情報が輸送指令室等にリアルタイムに伝達・表示されるシステムを構築している。「防災情報システム」と呼ばれるこのシステムは、列車の運転規制や災害警備に重要な役割を果たしている。

本装置においては傾斜角度が120秒以上連続して規制値を超えた場合に、そのことを知らせる警報情報が制御盤から防災情報システムを経由して輸送指令室等に伝送される。指令室ではこの警報に基づき、列車の運転中止や現地調査を指示することになる。

一般的に防災情報システムにおいて警報が発令される規制値は、ある大きさ以上の変位が発生して列車の安全運行が脅

かされるか、ある大きさ以上の自然外力が加わったため自然災害が発生する恐れがある、という観点から定められている。

本装置の場合は、橋脚の傾斜に伴い上に敷設されている軌道に変位が発生し、その変位量が列車の走行安全性に影響を及ぼすような時の傾斜角度を規制値としている。具体的には、JR東日本では列車の走行安全性を確保するため軌道変位の管理値を定めており、左右のレールの高さの差(高低)、レール側面の長さ方向への凸凹(通り)などの変位量を管理している。橋脚の傾斜量と軌道の変位量を精度良く定式化することは困難であるが、変形を単純な剛体と仮定して、「高低」及び「通り」が管理値を超える時の傾斜角度を規制値と定めている(図3)。このため橋脚の諸元により規制値は異なるが、概ね0.2～0.4度が運転中止の規制値となっている。

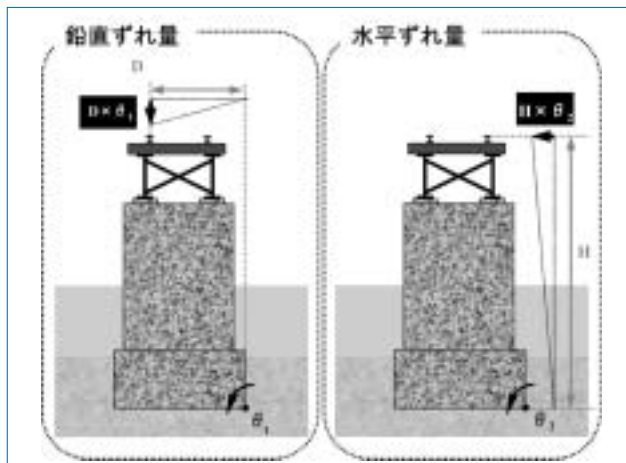


図3：橋脚傾斜角度と軌道変位量の関係

洗掘の恐れがあり、かつ防護工等の整備が完了していない橋りょうに本装置の設置が進められ、2002年度末までに147橋りょうへの設置が完了する予定である。本装置が設置された橋りょうで洗掘が発生した事例は未だ無く、平常時に観測された傾斜角度の一例を図4に示す。

本装置は現在30分間隔でデータを保存するように設定しており、図4a)は測定された傾斜角度の3ヶ月間の時系列を表している。これより、傾斜角度は微小に振動しながら日変動を記録していることが分かる。また、ところどころデータが大きく跳躍している箇所は、橋りょう上を通過した列車の影響を示している。

図4b)も同じデータをプロットしたもので、円は規制値を表している。これより、平常時の傾斜角度はほぼ一定の範囲内に収まっており、かつその領域は規制値より十分小さいことが分かる。

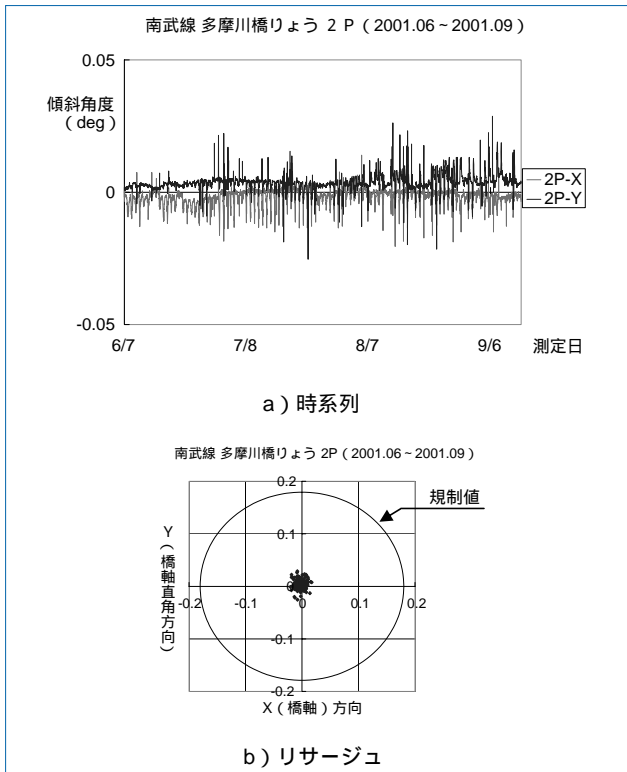


図4：観測データ

### 3 傾斜角度の予測手法

本装置では傾斜角度の大きさから危険度を判断しているが、洗掘の危険度は傾斜角度だけでなく傾斜の進行速度からも判断される。すなわち、傾斜が速く進行している状態ほど、橋脚はより危険な状態にあると言える。

一方、本装置は傾斜角度のデータを指令室まで伝送しているわけではないので、橋脚が傾斜し始めている場合でも、傾斜角度が規制値に達するまでは洗掘の発生を検知することができない。

そこで、洗掘に対する安全性を高めるため、現在設置されている傾斜型洗掘検知装置のハードウェアの構成を変えることなく、傾斜の進行性を判断する機能を付加することを検討した。具体的には、傾斜角度の時系列から統計的に将来の傾斜角度を予測し、予測値が規制値を超えた時に規制を発令する(図5)。これにより、橋脚が危険な状態になる前に確実に警報を発令することができ、また規制値に達するまでの時間から傾斜の進行性を判断し、現地調査等の対応の準備に活用することもできる。

これらの予測情報を装置に組み込むことにより、本装置の機能を向上し、より合理的な運転規制を実現できると考えられる。

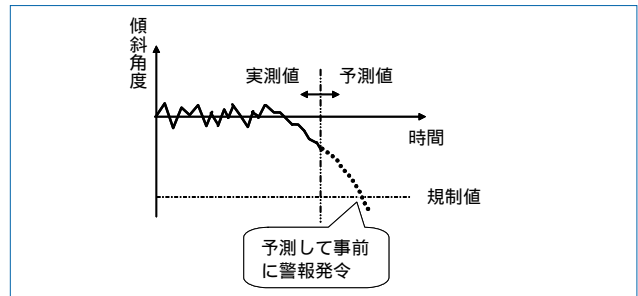


図5：予測を用いた運転規制のイメージ

このような機能を実現させるため、傾斜の進行を傾斜角度の時系列から統計的手法により予測し、なおかつ現行の傾斜型洗掘検知装置に組み込めるような予測式を検討した。検討にあたっては、現在の装置構成を変更することなく組み込めることを前提とした。即ち、現在設置されている傾斜型洗掘検知装置は観測値の規制値に対する超過の有無のみプレダスに送信し、角度データを送信していないので、制御盤内のシーケンサのみで予測計算が実行できるように、なるべく簡易な数式である必要がある。

一方、検討のもととなる洗掘時の橋脚の傾斜角度の時系列データが存在しないので、橋脚のような構造物が支持力を失って傾斜していく状態を模型により実験し、傾斜角度の時系列データを取得した。一例を図6に示す。

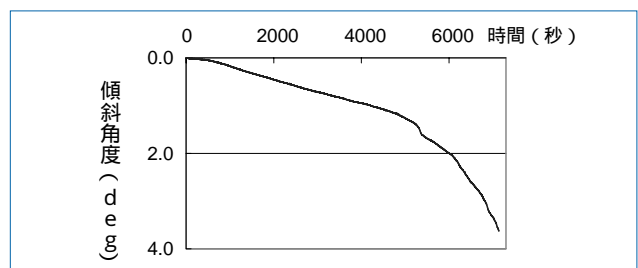


図6：傾斜角度の時系列

条件により模型が倒れるまでの経過時間や傾斜速度に違いはあったが、いずれのケースも非線形の増加トレンドが見られる点は同じであった。洗掘を受けて支持力を失った橋脚が傾斜する際も、同じようなトレンドを持った時系列になると考えられること、現行の装置で比較的単純な傾斜パターンが予測できるか検討することが目的であることから、このような時系列データを用いて、予測式の検討を行なうことにした。

非線形の増加トレンドを示す時系列を予測する数学モデルには差分を用いる方法や回帰分析を行なう方法など種類があるが、簡易であることを考慮して、2次式モデルと指数モデルの2式を検討した。

2次式モデル

$$y = \beta_0 + \beta_1 t + \beta_2 t^2$$

指数モデル

$$y = \beta_0 \cdot \beta_1^t$$

(y:傾斜角度、t:予測先時間)

係数は過去のデータに基づき最小二乗法などによって求められ、新しいデータを取得するごとに更新される。

予測計算を行なうにあたっては、列車通過などの外乱による影響を考慮するため、実橋りょうで観測されているデータを実験で得られたデータに重ね合わせた。

予測は各時刻ごとに過去n点のデータを用いて係数を算出し、この式を用いて $t=n/2, n, 2n, 3n$ 点先の値を計算した。両モデルとも、係数を算出するためのデータ数が同じであれば、遠い将来を予測するほど予測値のバラツキが大きくなる点は同じであったが、指数モデルに比べて2次式モデルの方が、予測値のバラツキが多く見られた。また指数モデルの場合、観測データのトレンドの向きに、観測値より大き目の予測値、すなわち安全側の予測結果を算出していた。

図7は図6の傾斜角度データに上に示した実橋りょうでの外乱を付加したデータに対し、各モデルを用いて計算した予測値を重ね合わせたものであり、過去18点のデータを用いて54点先の予測値を計算している。2次式モデルの場合は実現値に対して予測値のバラツキが大きいのに対し、指数モデルの場合はそれ

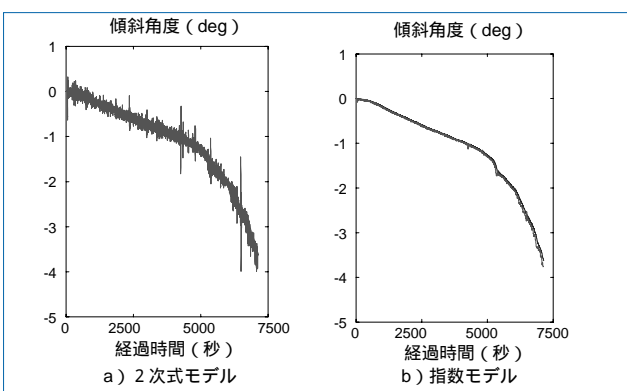


図7：予測計算結果

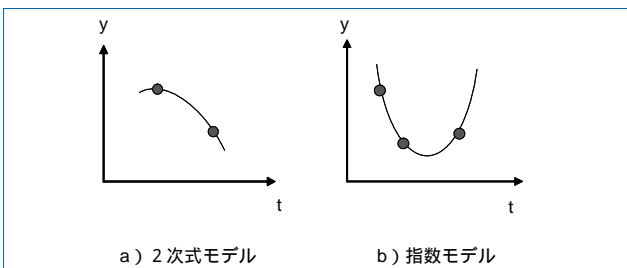


図8：係数決定

が見られない。つまり2次式モデルの方が指数モデルより外乱の影響を受けやすく、場合によっては誤警報の恐れがあることが分かる。

その理由としては、座標平面上でそれぞれのモデルを一意に定める際に必要となる座標の数などの数学的性質の違いが影響していると考えられる。すなわち、2点から係数が定まる指数モデルは単調増加モデルであるのに対し、3点から係数が定まる2次式モデルは係数の決定に用いたデータの配置が上に凸か下に凸かによって、予測の方向が変わるためと考えられる。

以上より、予測にあたっては外乱による影響が比較的少ない指数モデルが適していることが分かった。またこのモデルは簡明であるため、本装置の制御盤内のシーケンサに簡単に組み込むことができ、実験により出力結果を確認したところ、PC上で計算した結果と一致した。

このように既存の傾斜型洗掘検知装置に、傾斜角度の進行を予測する機能を付加することが可能であることが分かった。予測機能を付加することにより、既に述べたような傾斜の進行状況を現地から離れた指令室等で把握できることが期待される。実用化に向けては、データ取得間隔や予測先時間などの予測手法の詳細、また予測プログラムの信頼性を今後現地において検証する必要がある。例えば予測先時間については、保守係員が現地に到着して調査を行なうまでの時間や線区の重要性を考慮して決定する必要がある。

#### 4 おわりに

本装置の開発・設置により、洗掘による橋脚の変位をモニタリングし、事前に列車の運行を中止することが可能となった。

橋脚の傾斜角度を継続的に観測するという試みはこれまであまり例がないが、今回多数の橋りょうに本装置が設置されたことにより、多数の傾斜角度データを得ることが可能となった。これらのデータから橋脚ごとの履歴に応じたより合理性の高い規制値の設定方法を今後検討する必要がある。

また、本装置の高機能化のため、予測機能を付加することを検討し、簡易な予測モデルによりこの機能を実現できる可能性のあることが分かった。現地試験等によりさらに検証する必要があるが、今後シーケンサの発達によって、傾斜の変動速度に応じてデータ取得間隔や予測先時間を変更するようなアルゴリズムを組むことが可能になれば、より実用性が高まると考えられる。