

ワイヤレス傾斜計による河川堤防の変形モニタリング手法の開発

山口大学 学生会員 栗栖直之, 正会員 森啓年, 今村能之, 中田幸男, 佐々木翔太
エコマス(株) 安藤竜馬

1. はじめに

1.1 背景

河川の増水時に河川堤防の基盤に水が浸透し、堤内地に土砂と地下水が噴出するパイピングは、堤防の決壊を引き起こし深刻な被害をもたらす危険性のある現象である。パイピングによる決壊が確認された事例として、平成 24 年に九州北部で発生した梅雨前線に伴う豪雨が挙げられる。決壊箇所付近の水位は計画高水位を 5 時間以上超過し、水位が下がり始めたところで決壊が発生した。決壊が生じた箇所は粘性土で構成される堤体下の基盤に透水性の高い砂層・砂礫が分布しており、この透水層に間隙水圧が作用しパイピングが発生したと報告されている。決壊前には、基盤から濁った漏水が吹き上げていたことが目撃されており、高水位が作用し続けることによって堤防が進行的に破壊されたと考えられる。このようなパイピングによる決壊の予兆として漏水や盤ぶくれ(図-1)が起こることが知られている。

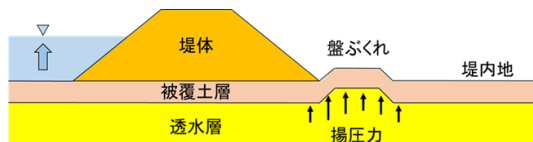


図-1 盤ぶくれの概略図

佐波川左岸堀地区は堤防詳細点検の結果、パイピングに対する安全性を満足していないことが判明した。¹⁾

一般的なパイピング対策として、遮水シートや鋼矢板によって基盤への浸透を遮水する工法が用いられている(図-2)。しかし、佐波川左岸堀地区では周辺の地下水利用から、その流れを遮断する遮水シートや鋼矢板の使用が困難である。

そこで、土木研究所が開発した「堤内基盤排水工法」が採用・施工された。盤ぶくれの発生が懸念される個所に図-3 に示す工法を施工することで、透水層の排水を促し、揚圧力を低減させるものである。

しかし、実績が蓄積されていない新工法であるため、堤体内水位のモニタリング等による対策効果の確認が必要である。²⁾

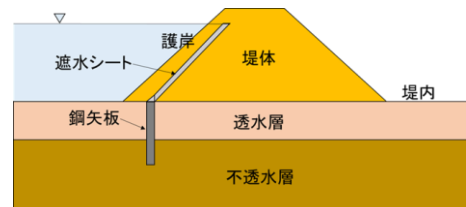


図-2 鋼矢板や遮水シートによるパイピング対策

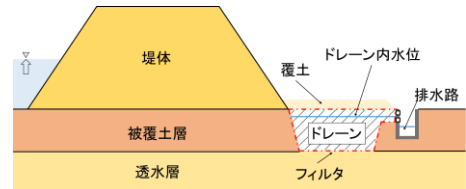


図-3 堤内基盤排水工法の概略図

1.2 研究目的

本研究は堤内基盤排水工法の効果確認のため、ワイヤレス傾斜計(以下センサ)によりパイピングの前兆現象である堤防の変形(盤ぶくれ)を観測する技術を開発することを目的とする。本研究で使用したセンサは安価であるが、観測される傾きは温度の影響を受け、気温の変化によって実際とは異なる観測値を出力すること、電源を太陽電池及び蓄電池によって確保しているため、植生や日照によって動作が不安定になること等の課題がある。そこで本研究はセンサを地上と地中にそれぞれ設置し、外気温の影響を受けにくい地中のセンサの計測値は温度補正後の精度検証のために用いて、外気温の影響を受けやすい地上のセンサの観測値から温度の影響を補正することを試みる。また、設置高さを変え、安定した通信と日照量を得ることによる稼働時間の違いを検証する。

キーワード：河川堤防, モニタリング, 盤ぶくれ

連絡先：〒755-8611 宇部市常盤台 2-16-1

E-mail:u033fd@yamaguchi-u.ac.jp

2. センサの概要と設置方法

2.1 センサの概要

地上センサ(図-4)は傾きと温度を計測できる。地中センサも地上の太陽電池で発電された電力を使用して傾きと温度の観測を行い、計測したデータを地上センサに有線で送信する。計測された各センサのデータは地上から無線によって集約ユニットに送信された後、クラウドにアップロードされ、24 時間インターネットから観測データを取得できるシステムとなっている。(図-5)

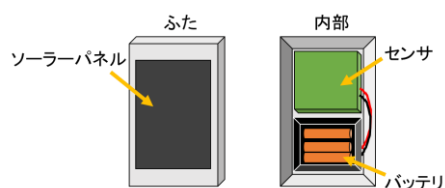


図-4 地上センサ



図-5 センサのデータ取得体系

2.2 センサの設置方法

2.2.1 設置位置

佐波川左岸堀地区の河川堤防において堤内基盤排水工法の効果確認のため、対策工無区間 50m と対策工有区間 150m の合計 200m の区間に法肩、法尻と壁面に図-6 に示すように傾斜計を計 18 個設置した。

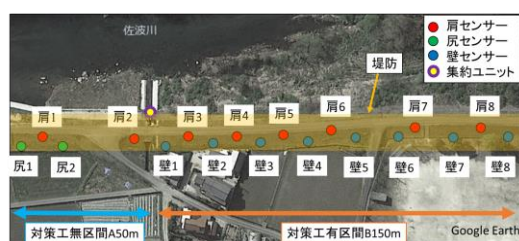


図-6 センサの設置方法

2.2.2 設置方法

図-6 に示した 18 個のセンサは法肩、法尻、擁壁のそれぞれによって設置方法が異なる。図-7 に法肩センサ設置概略を示す。単管パイプを打ち込み地上から高さ 200mm 程度に地上センサと、覆土を 200mm 程度掘り下げて、地中センサをそれぞれ設置した。法尻においては単管パイプを打ち込み、高さ 200mm

程度に地上センサのみを設置した。図-8 に擁壁センサ設置方法の概略を示す。法尻が擁壁になっている対策工有区間においては、擁壁に穴を開け、ボルトを用いてセンサを固定した。



図-7 法肩センサ設置方法



図-8 擁壁センサ設置方法

3. 観測精度の向上

図-9 に肩 1 地上センサの傾きの計測値の時系列を示す。グラフが断続的になっている部分は欠測で、センサと集約ユニット間の通信電波強度が弱くなることや、センサのバッテリー不足により観測がストップしたことが原因である。また、2017 年 11 月 29 日に地上センサを固定する単管パイプの延長を行ったため、11 月 8 日以前の観測値と 12 月 2 日以降の観測値で大きな差が生じている。そのため、観測を再開するたびに、観測値を 0° にリセットした。なお、観測期間中に出水はなく、堤防の変形は生じていない。

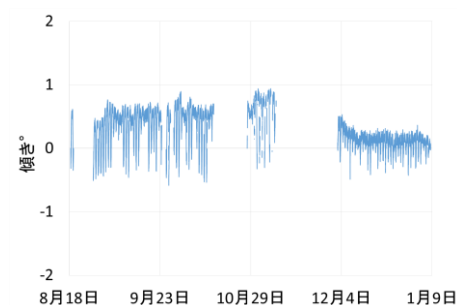


図-9 肩 1 地上センサの傾きの観測値の時系列

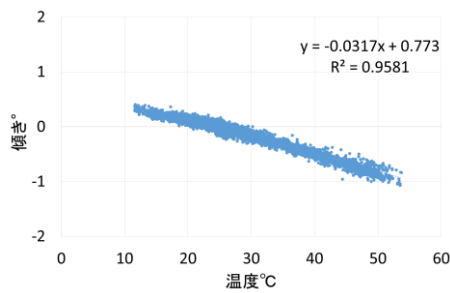


図-10 肩1センサの温度と傾きの観測値の散布図
図-10は傾きの計測値と温度の散布図である、これから温度と傾きの観測値には高い線形相関($R^2=0.9581$)があることがわかる。そのため、直線の回帰式(図-10に示す y)を用いることで温度による影響を補正することが出来る。地上センサの傾きを温度と傾きの関係を表す回帰式を用いて補正を行い、温度による影響を受けにくい地中センサの傾きと比較した。以下に温度による影響の補正の手法を示す。散布図から以下の式(1)のような線形の回帰式が得られた。

$$y' = ax + b \quad (1)$$

ここで、 x が温度であり、 a 、 b は回帰係数である。式(1)の x に地上センサの温度の観測値を代入し、温度による影響を受けた傾きの値である y' を計算する。その上で実際の、傾きの観測値から y' の値を引くことによって、温度による影響を補正した傾きの値を求める。

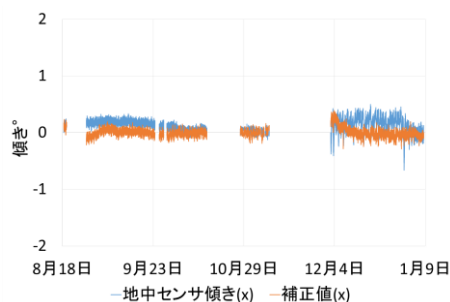


図-11 温度の影響を補正した肩1地上センサの傾きと地中センサの傾きの時系列

図-11に温度の影響を補正した肩1地上センサの傾きと地中センサの傾きの時系列を示す。ここでは、紙面の都合で肩センサのみ示す。これより、回帰式を用いた補正によって温度の影響を軽減し、温度の影響を受けやすい地上センサによっても傾きを精度良く計測出来るようになったことがわかる。

図-12に示す様に他のセンサについても同様の補

正方法によって観測値の分散を $0.2(^{\circ 2})$ 以下と地中センサとほぼ同等に軽減できた。



図-12 肩地上センサの補正值と地中センサの傾きの分散

4.稼働時間の改善

観測開始当初(2017年8月18日)、地上から高さ200mm程度の地点にセンサを設置していたが、センサ間の通信が不安定になることや、日照不足による太陽電池の発電量低下により、センサが稼働しなくなる時間が生じた。そのため、2017年11月29日に地上センサの設置位置を単管パイプの延長によって地上から高さ700mm程度の位置に設置し直した。そして、単管パイプ延長前後をI期(2017年9月1日～11月1日)、II期(2017年12月2日～2018年1月2日)として、センサ稼働率を式(2)に従って求め、センサごとにI期とII期の稼働率を比較した。

$$\text{稼働率}(\%) = \frac{\text{欠測を除いた観測時間}}{\text{全観測時間}} \times 100(\%) \quad (2)$$

図-13に肩1地上センサを設置している単管パイプの延長前後の様子を示す。



図-13 肩1地上センサを設置している単管パイプの延長前後の様子

図-13にI期とII期における肩センサの稼働時間の比較を示す。ここでは、紙面の都合で肩センサのみ示す。なお、肩7センサのII期についてはセンサの故障により、観測が行われなかったことから、分析からは除外した。

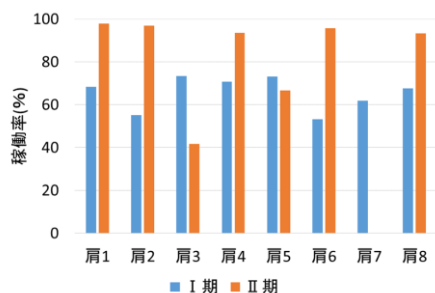


図-13 I期II期における肩センサの稼働率の比較

図-13 よりI期とII期の稼働率の肩センサ平均を比較するとI期に比べII期は稼働率が 18.2%増えたことがわかった。このことは単管パイプの延長によってセンサ間と集約ユニットの通信状況が改善されたこと、ソーラーパネルへの日射量の増加による発電量が増加したことを意味していると考えられる。I期の観測データは日射量の多い夏季であり、II期の観測データは日射量の少ない冬季であるにも関わらず稼働率が増加したことは、センサを地上からある程度離れた位置に設置し、植生によるソーラーパネルへの日照量の減少を防ぐことが稼働率の上昇のために重要であることを示していると考えられる。

しかしながら、肩 3、肩 5、のように、II期の方がI期に比べて稼働時間が減っているものがある。原因については調査中である。

また、動作が停止してから再開させるには人手が必要であり、それが稼働率にかかわることから、センサ機器そのものの信頼性の向上も重要な課題である。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下にまとめる。

- (1) 地上センサが観測する傾きは、温度の影響を受ける。地上センサの傾きと温度の相関性を散布図によって比較したところ、両者には高い線形相関があり、傾きの観測値と温度の回帰直線の式を求め、回帰式を利用して温度が傾きの計測値に与える影響を補正できることが明らかになった。
- (2) センサ間の通信状況の悪化や日射量の不足によるソーラーパネルの発電量の減少に伴うデータ観測の欠測期間が生じた。単管パイプの延長によ

って地上から高さ 200mm 程度の地点に設置されていたセンサを、地上から高さ 700mm 程度の地点に再設置したところ、センサの稼働率が上昇する傾向が確認された。しかし、いくつかのセンサにおいては稼働率が減少しており、原因の調査が必要である。

謝辞

本研究の実施にあたり国土交通省中国地方整備局山口河川国道事務所のご協力を頂きました。また、本研究は JSPS 科研費 JP16H03152 の助成を受けたものです。厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 佐波川堤防詳細点検結果情報図
http://www.cgr.mlit.go.jp/yamaguchi/river/pdf/sabagawa_teibousyousai.pdf(2018年2月11日閲覧)
- 2) (国研) 土木研究所地質・地盤研究グループ土質・振動チーム：堤内基盤排水対策マニュアル（試行版），はじめに，平成29年1月