

水防技術の高度化に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）
研究期間：平 18～平 20
担当チーム：土質・振動チーム
研究担当者：杉田秀樹、森啓年、斎藤由紀子

【要旨】

出水時の水防活動において水防団が果たす役割は大きい。しかし、その団員数は減少する傾向にあり、同時に高齢化も進んでいるため、その水防力の維持が重要な課題となっている。そこで、水防団の現状を踏まえ、必要な水防力を維持するために、水防工法の省力化、情報共有の効率化及び新技術による巡視の高度化という観点から研究を行った。具体的には、省力化釜段による漏水対策技術、インターネットを活用した情報共有技術、新技術を活用した漏水検出技術について検討した。その結果、2名の水防団員により 20 分程度で構築可能な省力化釜段・月の輸工を開発するとともに、携帯電話から利用可能で安価かつ操作が容易な水防情報共有システムを提案した。

キーワード：水防団、水防技術、漏水、情報共有

1. はじめに

水防ハンドブック¹⁾によると「洪水という自然現象から受ける人命、財産への被害を最小にするために個人あるいは自衛の取組み全般」を広義の水防活動と定義している。それに対して、出水時に河川堤防を破堤などの壊滅的な被害から防止する巡視や水防工法の実施はいわゆる狭義の水防活動と言える。その狭義の水防活動(以下、「水防活動」)において、水防団は重要な役割を担ってきた(写真-1)。ほとんどの水防団は、地域の消防団と兼務し、ひとたび出水により河川水位が上昇した際には、水防管理団体である市町村等の指示により水防活動に従事する。



写真-1 水防団活動の例

このように水防活動に大きな役割を果たす水防団であるが、その団員の減少・高齢化が進んでいる(図-1)。また、水防団に専従する団員数は減少の一途をたどり、いわゆるサラリーマン団員の割合は上昇の一途をたどっている。

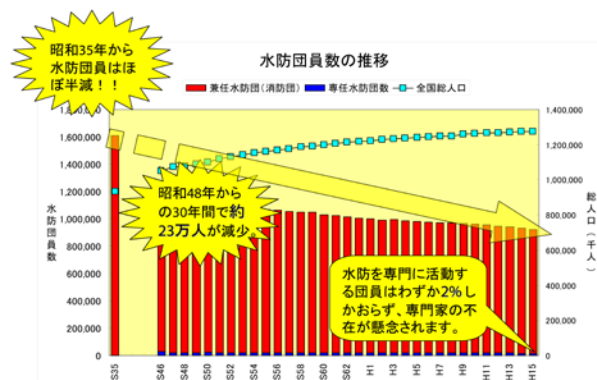


図-1 水防団員数の推移 (国土交通省)

本研究では水防団の置かれている現状を考慮し、今後の少子高齢化の進展により水防団員数が減少していく中でも、出水時に必要となる対応能力(以下、「水防力」)を確保するため、以下の観点から研究・開発を行った。

①水防工法の省力化

既存の水防技術は人海戦術が基本であり、その実施には多数の人員と資材が必要となる。そこで、巡視における変状発見時の初動対応として、少人数で迅速に実施可能な漏水対策技術の開発を目指した。

②情報共有の効率化

水防活動時における情報伝達は主に無線や携帯電話等で実施されている。そのため、情報伝達はされても、情報共有という視点は乏しく、同じ流域であっても異なる水防団間や河川管理者との水防情報の共有が必ずしも効率的になされていなかった。そこ

で、水防活動を効率化するため携帯電話とインターネットを用いた水防団、河川管理者、将来的には流域住民を含めた低コストの水防情報共有システムの提案を目指した。

③新技術による巡視の高度化

目視による巡視は水防活動の基礎となるものであるが、夜間や悪天候時に漏水箇所等を発見することは困難である。そこで、音響や温度など様々な原理の計測技術の漏水検知への適用可能性について実験的検討を行った。

2. 研究方法

2.1 水防工法の省力化

2.1.1 現状

既存の水防工法は、土嚢や木材を使用した伝統的な工法が中心である(図-2)。これらの工法は、長年にわたり使用されてきた実績のある技術であり、安価に実施可能な点が特長である。一方で、実施には多くの人手と資材が必要であり、また経験や修練が求められる。例えば、一般的な漏水対策技術である月ノ輪工は約350体の土嚢袋とそれらに詰めるための土4m³、40本の鉄杭が必要であり、その作成には25人程度が1時間程度従事する必要がある²⁾。

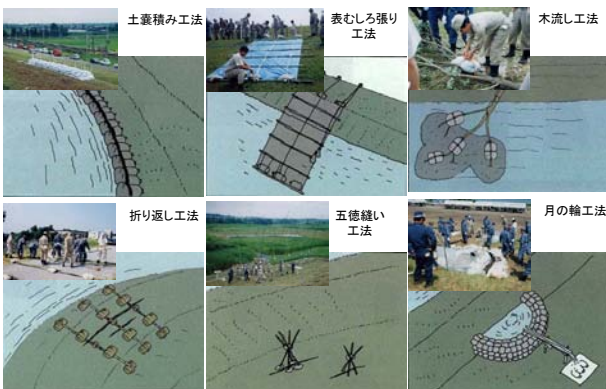


図-2 主な水防工法(埼玉県ホームページ)

2.1.2 省力化釜段・月の輪工の開発

本研究では、2名で20分以内に構築できることを目標とした漏水対策技術である省力化釜段・月の輪工を開発した。本技術は漏水箇所に鉄製の大型リングを打ち込み保護し、堤体土の流出を防ぐとともに、薄手で柔軟性に富み高強度の遮水シートと単管によって釜段・月の輪工を構築するものである(写真-2)。



写真-2 省力化釜段・月の輪工

2.1.3 検証実験

実験では省力化釜段・月の輪工についてその効果とともに、設置作業の所要時間を確認した。堤内地側(川裏側)の半断面のみモデル化した実験模型を使用した(図-3)。堤体土質は茨城県内で採取した山砂、基礎地盤土質は粒径の揃った川砂と関東ロームを用いた。模型中央には弱部となる直径20cm、深さ40cm程度のパイピング孔を設置し、漏水がその地点で発生するよう工夫した。その結果、外力条件として、動水勾配0.57、内外水位差1.4m(外水位は堤防天端位置)の時点でパイピング現象が発生した。

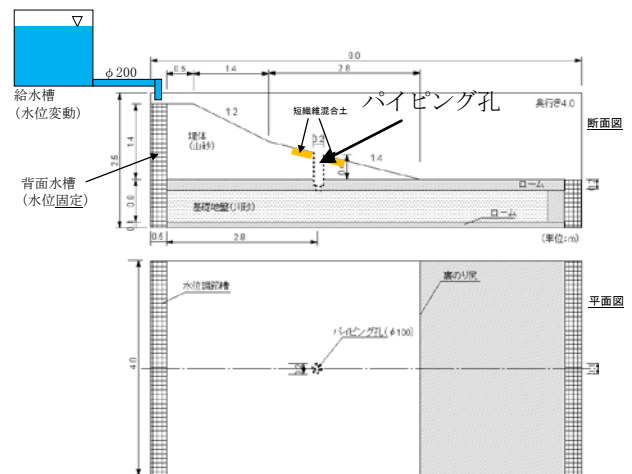


図-2 実験概要

図-3 実験概要図

2.2 情報共有の効率化

2.2.1 現状

愛知県のように地上系の大容量デジタル多重マイクロ無線回線を構築している場合もあるが、水防活動時には主に通常の防災無線や携帯電話によって情報伝達が行われている。そのため、最新の防災情報、例えば水防団による巡視で発見された変状などが、他の水防団や河川管理者とうまく共有ができていな

い、もしくはできていたとしても迅速性が求められる水防活動では遅延が生じる可能性もある。

2.2.2 無料水防情報共有システムの提案

本研究では、現在ほとんどの携帯電話に搭載されているカメラを使用して、リアルタイムに情報共有が可能なシステムを提案する。インターネットにおいて無料で利用可能な写真共有サービスを活用することにより、負担となるサーバー等の維持管理から解放され、携帯電話のデータ通信料だけで情報共有システムを構築できることが特長である。なお、GPS機能を持つ携帯電話では、ジオタグと呼ばれる位置情報を画像データに付加することにより、地図上に撮影地点を表示することが可能である。

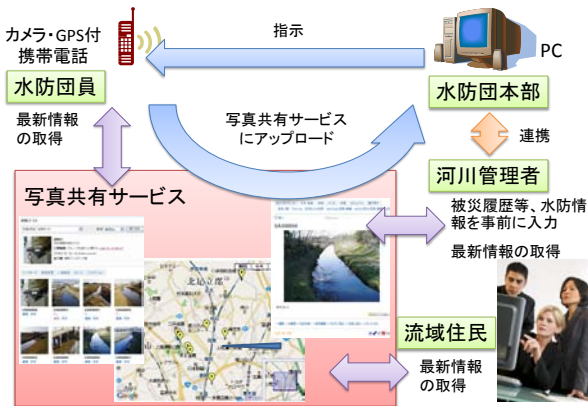


図-4 水防情報共有システムの概要

2.2.3 試行

インターネット上から多数存在する写真共有サービスの中から、以下の条件で試行に使用するサイトを選定した。

- ① 携帯電話から写真をアップロード可能、
- ② 画像に記された位置情報により地図上に写真の位置を表示可能。
- ③ 日本語で利用可能

その結果、平成21年2月現在では、フォト蔵などがそれらの条件に合致しめため、フォト蔵を用いて情報共有システムの試行を実施した。

試行は、運用開始、準備、水防活動時、水防活動後の四段階に分けて実施した。また、水防団本部（以下、「管理者」）、河川管理者（以下、「情報準備側」）、水防団員（以下、「情報提供側」）と不特定の情報表示側（河川管理者、水防団員、流域住民等を想定）を関係者として設定した。図-5に運用の流れを示す。

2.3 新技術による巡視の高度化

2.3.1 現状

水防活動時の巡視においては、降雨や夜間などの悪条件下においても、堤防からの漏水等の変状検知が求められる。しかし、視界が悪い状態や植生の影

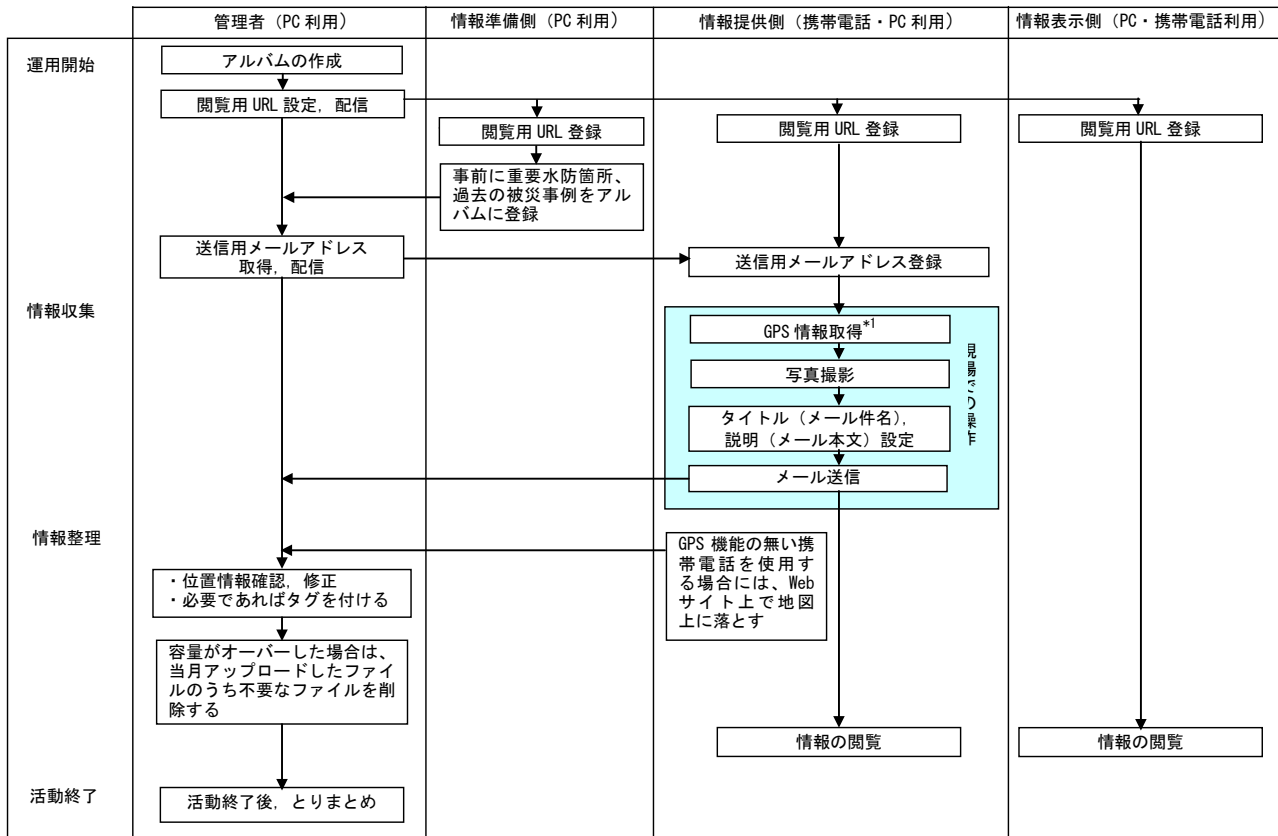


図-5 水防情報共有システム運用の流れ

響がある場合などは、その発見は非常に困難である。また、巡視は重要水防箇所を中心に行われるが、過去の詳細な被災位置などの情報が不足している場合、漏水の規模が大きくなるまで発見できない可能性がある。

2.3.2 活用する新技術

本研究では、新技術を用いた漏水の検知技術について検討を行った。新技術として、音響診断、比抵抗電気探査、赤外線サーモグラフィ、間隙空気圧計について、その適用性を検証した。各技術の概要は以下の通りである。

① 音響診断による方法

パイピングが発生する直前は、平常時に比べて、地盤中の水の浸透や土構造の微小な変化によって地中音の微小な変化が発生すると考えられる。そこで、漏水が予測される箇所において加速度センサを設置し、音響診断装置を用いて地中音の計測を実施することにより漏水を検知できる可能性がある。測定概念図を図-6に示す。

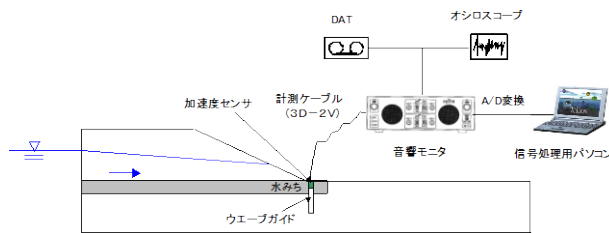


図-6 音響診断法の測定概念図

② 比抵抗法電気探査による方法

比抵抗法電気探査は、地盤に直流電流を通じた際に地表に生じる電位応答から地盤の比抵抗分布を求める手法である。地盤の比抵抗は、土層の間隙率、水分飽和率、間隙水比抵抗、粘土鉱物含有量および温度などの要因により変化する。そこで、漏水が予測される箇所において比抵抗計測装置を設置し、見掛け比抵抗値の計測を行うことにより、漏水を検知できる可能性がある。

③ 赤外線サーモグラフィによる方法

地下水の挙動を把握するために、1m 深地温探査のように浅層部の地温を測定することで地下の熱環境を把握し、漏水や伏流水等の水の動きを評価する方法がある。そこで、赤外線サーモグラフィを用いてパイピング実験中の模型の地表温度の計測を行うことにより、漏水を検知できる可能性がある。

④ 間隙空気圧計による方法

パイピングや裏のりすべりの際には、地表面から

の雨水や内水により間隙中の空気の逃げ道がなくなることにより、その圧力が増大する可能性がある。実施の被災現場でも、気泡を伴った水の流出や漏水が発生するケースが確認された場合もある。そこで、漏水が予測される箇所において間隙空気圧計を設置し、圧力の計測を行うことにより、漏水を検知できる可能性がある。

2.3.3 実験方法

パイピングに関する模型実験は、①音響診断と②比抵抗法電気探査を用いたケース（ケース1）と③赤外線サーモグラフィと④間隙空気圧計を用いたケース（ケース2）を実施した。各ケースの断面図を図-7、8に示す。

いずれのケースでも、あらかじめ72時間以上かけて基礎地盤の飽和处理を行った後、湛水開始から60分かけて天端-0.2mの高さまで給水槽の水位を上昇させた。また、ケース1では10mm/hrの降雨を降らせた。湛水中はマンメータおよび間隙水圧計による水位計測を行った。実験はパイピングが発生するか、または浸透水により地盤が泥濁化した段階まで実施した。各技術の測定状況は以下の通りである。

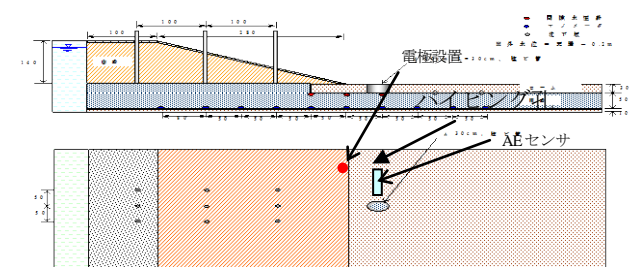


図-7 模型断面図（ケース1）

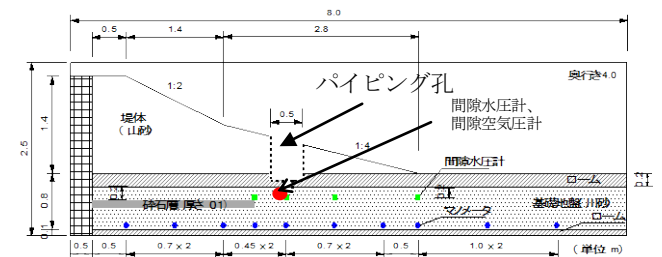


図-8 模型断面図（ケース2）

① 音響診断による方法

本実験では、シールド工事における切羽探査に用いられてきた音響診断法を適用した。本手法は、アコースティックエミッション（AE）センサが地中を浸透してきた水の振動を計測することにより、電圧の変化としてスピーカーに入力されたものが音響として認識される。そこで、裏のり尻のパイピング孔付近に加速度センサを設置し、音響診断装置を用い

て地中音の計測を行った。使用した音響診断装置を写真-3に示す。



写真-3 音響診断装置

AE センサの設置位置は、被覆土（ローム）層の直下となるよう、基礎地盤面から深さ 40cm の位置とした。計測間隔は 10 秒間隔とし、実験終了まで連続計測を行った。

② 比抵抗法電気探査による方法

本実験における見掛け比抵抗の測定は、二極法とウェンナ法の 2 種類で実施した。各測定方法の概念図を図-9（赤破線囲い部）に示す。電極はパイピング孔を中心として 10cm 間隔で 20 本設置（探査範囲：測線方向に 10 列 200cm、探査深度：深度方向に 4 層 40cm）し、50 箇所で見掛け比抵抗値を計測できるようにした。1 回の計測に要する時間は 250 秒（50 箇所×5 秒）とし、実験終了まで 15 分間隔で連続計測を行った。電極の設置状況を写真-4に示す。

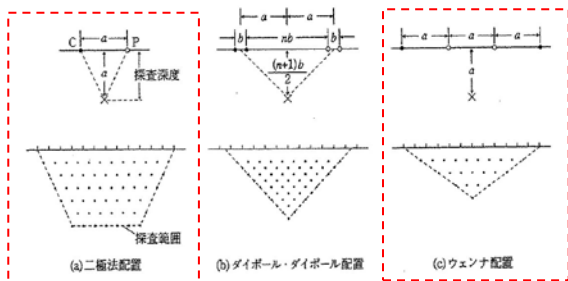


図-9 比抵抗法電気探査の電極配置

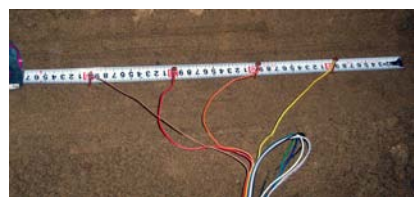


写真-4 比抵抗法の電極設置状況

③ 赤外線サーモグラフィによる方法

本実験では、極力簡易な方法で温度変化を把握する目的で、写真-5に示すような携帯型の赤外線サーモグラフィを用いてパイピング実験中の模型の地表温度を計測した。同機器は対象物にカメラレンズを向けて撮影し、熱画像としてデータを保存するものである。撮影した画像ファイルは、PC 上で画像処理を施し、地表部分の温度の変化について確認した。



写真-5 携帯型赤外線サーモグラフィ

④ 間隙空気圧計による方法

本実験における間隙空気圧計として、間隙水圧計の受感部に開孔径 $2\mu\text{m}$ のガラスフィルターを設置し、防水スプレーを塗布することにより作製した。作成した間隙水圧計を、裏のり尻のパイピング孔付近に間隙空気圧計を設置し、空気圧の挙動を計測した。写真-6に間隙空気圧計を示す。

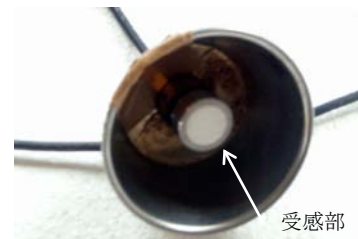


写真-6 間隙空気圧計

3. 研究結果

3.1 水防工法の省力化

省力化釜段・月の輪工の設置作業は、パイピング現象の発生直後に開始し、設置後は漏水対策として問題なく機能した。設置作業は、60 歳代男性 2 名で実施し、作業時間の合計は第一段階で 13 分半、第二段階までで計 23 分程度であった。ここで、第一段階とは、作業開始から水密シートを吊り上げて貯水を開始し、釜段・月の輪工として機能した時点のことである。一方、第二段階とは、仮留めした横断方向の単管を調整して単管枠の骨格のゆがみを直すとともに、単管の本数を増やして省力化釜段・月の輪工が完成した時点までのことである。

実験終了から 24 時間放置して、貯水の状況を確認

したところ、水密シートと地盤の境界から漏水した形跡はなかった。初動対応として、本技術を活用することにより、パイピングに伴う水みちが拡大し堤防に致命的な被害が生ずることを防止できると考える。

3. 2 情報共有の効率化

3.2.1 運用開始

(1) ユーザー登録

写真を共有するためのユーザーを登録する。登録に必要なものはメールアドレスである。フォト蔵では写真をアルバムという単位で管理される。公開の設定はアルバム毎に行われ、インターネット全体、友達として登録したユーザー、公開しないなど、複数のレベルで設定が可能である。この公開設定を利用して複数のユーザー間で情報を共有することが可能であるが、複数のユーザー間では地図情報が共有できない。このため、1つのユーザー登録を全員で共通して使用方法をとるものとする。

(2) アルバムの作成

フォト蔵では写真がアルバムという単位で管理されることから、アルバムは、情報を共有する単位毎（例えば出水や水防団ごと）に作成する。アルバム作成時に公開範囲を設定する。

3.2.2 準備

(1) 閲覧・編集用 URL 設定、配信

登録メールアドレス、パスワード及びアルバム名を情報表示側、情報提供側、情報準備側に連絡する。連絡を受けたものは、一度ログインをし、確実にログインできることを確認しておく。PCでアクセスした場合には、自動ログインの設定が可能であり、また、携帯電話でもユーザー名、パスワードを省略してログインできる機能(簡単ログイン)があるため、一度ログインして、その設定をしておくが良い。

(2) 事前の情報準備

アルバムが作成されたら、情報準備側は、重要水防箇所や過去の災害事例などをアルバムに登録する。フォト蔵の場合、1ヶ月のアップロード容量が制限されるため、情報準備側は、水防活動が行われない非出水期にアップロードしておくことが望ましい。

(3) アップロード用メールアドレスの配信

携帯電話から写真をアップロードするためのメールアドレスは、アルバムごとに割り振られている。作成したアルバムを開き、「アップロード」画面から「携帯電話から」を選択し、「メールアドレス」を確

認する。このメールアドレスを情報提供側に配信する。情報提供側は、アップロード用のアドレスを携帯電話の電話帳に記録するとともに、テスト配信をし、写真がアップロードされることを確認する。

3.2.3 水防活動時

(1) 水防情報の収集

水防情報の収集は、情報提供側が行う。水防のための情報共有は、迅速に行われることが重要であることから、携帯電話で写真を撮影し、その場で送信することを基本とする。

①GPS 付携帯電話による写真撮影

撮影した写真は、アップロード用アドレスに添付ファイルとして送信する。メールを送信する際、添付する画像に位置情報を付加し、メールタイトルには写真タイトル、メール本文には、撮影位置や現地状況など写真の説明を記載する。携帯電話でのGPS情報取得では若干のずれが生じる場合があるので、必要に応じて管理側がPC側で修正する。

②GPS のない携帯電話による写真撮影

GPS機能のない携帯電話で撮影した写真も、同様にアップロード用アドレスに添付ファイルとして送信する。メールタイトルには写真タイトル、メール本文には、撮影位置や現地状況など写真の説明を記載するが、位置情報は管理側が追加する。

(2) 情報の表示

フォト蔵にログインし、写真→アルバムとメニューを選択するとアルバムの選択画面になる。アップロードされた写真は、サムネイル表示による一覧形式から閲覧すること、または、地図上の撮影した位置から閲覧することが可能である(図-10)。個別の写真は、解像度を変えて表示することが可能である。

携帯電話から閲覧する場合には、サムネイル表示による一覧形式から閲覧することが可能である。携帯電話でのサムネイル表示画面を図-11に示す。



図-10 PCでの表示例



図-1 1 携帯電話での表示例

(3) 情報管理

管理者は、地図上の位置を確認し、位置が不適切であれば修正する。また、必要に応じて情報を加筆・修正する。

3.2.4 水防活動後

水防活動が終了した段階で、アップロードされた写真をダウンロードし、整理、保存する。

3. 3 新技術による巡視の高度化

(1) 音響診断と比抵抗法電気探査を用いたケース (ケース 1)

実験結果を図-1 2に示す。図-1 2から、時間の経過とともに基礎地盤および堤体内の水位が上昇している。観察結果から、湛水開始から3時間程度経過後にパイピング孔に溜まっていた水が満水となり、オーバーフローした。その後、およそ1時間後（湛水開始から4時間経過後）にのり面に亀裂が発生し、徐々に拡大し始めた。湛水開始から4時間45分後および5時間後にパイピング孔内の水を排水し、パイピング孔付近の挙動を注意深く確認したが、結果的にパイピングは発生しなかったため、5時間30分経過時点で実験を終了した。

図-1 3に音響診断法による AE センサの計測結果を、図-1 4に比抵抗法電気探査の計測結果を示す。上述のように、本実験ではパイピングが発生していないため、当初の目的に対する適用性の検討には至っていないが、観察結果との対比から、今後の適用可能性について検討を行うことができた。

図-1 3から、AE センサの値は、パイピング孔内の排水操作によってエネルギーの急激な増大が確認されたものの、それ以外では急激な変化は認められなかった。したがって、設置位置付近の飽和現象や満水後のオーバーフロー、のり面の亀裂等を明らかに捉えることはできなかった。

一方、図-1 4の見掛け比抵抗の経時変化は、時

間の経過とともに第 1,2 層を中心とした見掛け比抵抗が低下し、飽和に至る過程は捉えられていた可能性がある。湛水後 3 時間以降に第 1,2 層等で比抵抗が大きくなる傾向が見られたが、これはオーバーフローによって電極が水没したことによる可能性も考えられる。また、その後の比抵抗の増減はパイピング孔の排水操作等によって発生した可能性がある。このように、比抵抗法電気探査は水位変化に反応し易い傾向を有していると考えられる。

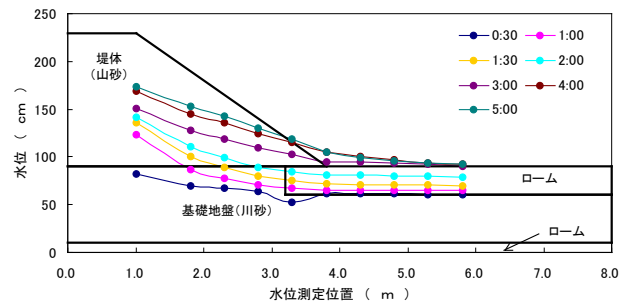


図-1 2 圧力水頭計測結果 (ケース 1)

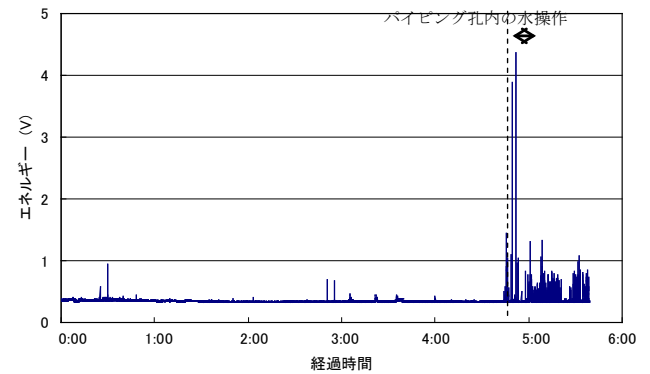


図-1 3 音響診断法の AE センサ測定結果

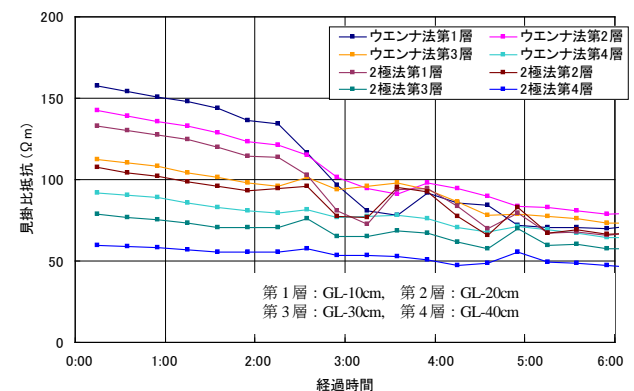


図-1 4 見掛け比抵抗の経時変化

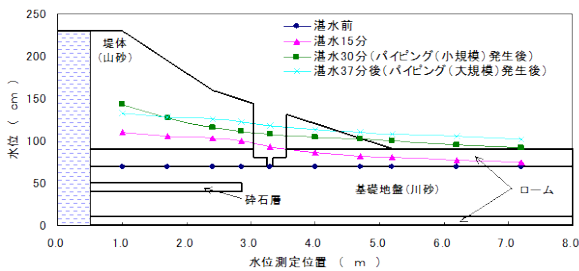
(2) 赤外線サーモグラフィと間隙空気圧計を用いたケース (ケース 2)

給水槽の水位を上昇させ始めてから 25 分後に弱点部中央のパイピング孔から徐々に漏水が始まった。28 分後に弱点部の上流側下端付近およびパイピン

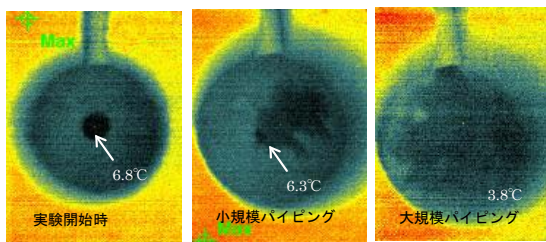
グ孔にかけて噴砂が発生し、35分後に噴砂とそれに伴って水の流出が顕著となった。その後、噴砂規模をさらに拡大し、実験を終了した。湛水による模型の水頭分布図—15に示す。給水層の水位上昇と同程度の速度で水頭が上昇していることから、碎石層で作成した水みちにより浸透が助長されていることが確認された。

実験中に赤外線サーモグラフィでパイピング孔付近の熱画像を撮影した。図—16に画像を示すが、パイピングの発生～規模拡大に伴って、温度の低い黒い範囲が拡大し、孔中央部の温度も低くなる傾向を示す。ケース2の実験では、湛水時に氷水を使用しており、堤体の温度に比べて給水槽から浸透する水の温度が低いために、その浸透現象を捉えられたと考えられる。ただし、温度変化を水みちとして捉えることはできなかった。

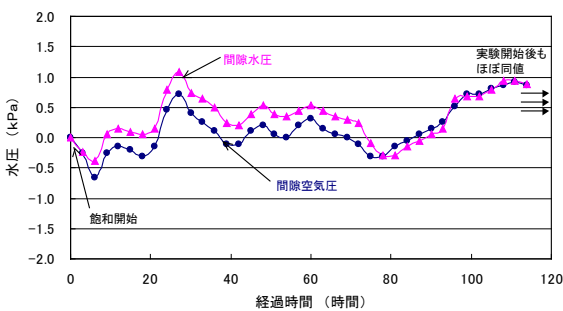
また、図—17にパイピング孔直下の間隙空気圧と間隙水圧の値を示したが、実験前に基礎地盤の飽和处理を行ったことで、飽和開始から80時間以降には両者はほぼ同様の値を示し、パイピング現象を捉える状態には至らなかった。



図—15 圧力水頭計測結果



図—16 サーモグラフィによる熱画像



図—17 間隙空気圧と間隙水圧の経時変化

4. まとめ

4.1 水防工法の省力化

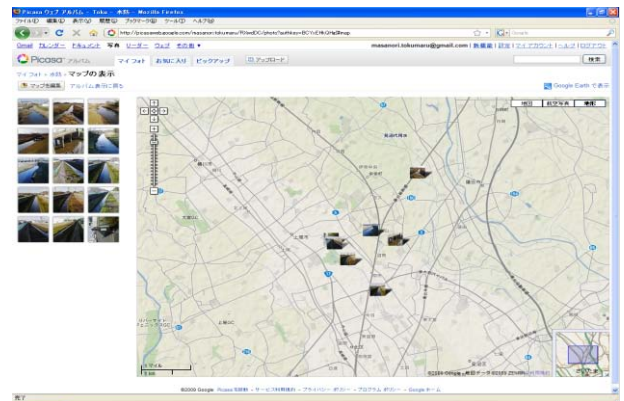
従来の水防工法の考え方に基ついて省力化釜段・月の輸工の開発とその検証実験を行った。その結果、漏水対策工法として必要な性能を持つとともに、設置作業を効率化できることが判明した。

今後の課題として、本技術の地表面の植生等の適用条件を明らかにすること、降雨や強風等洪水時に想定される気象条件の下での作業性を確認すること、等が挙げられる。

4.2 情報共有の効率化

携帯電話とインターネットを活用した水防情報共有システムを試行し、携帯電話のデータ通信料のみで活用可能な容易に操作できるシステムを提案した。

今後、実際の水防団等で試行し、課題を抽出することが必要である。また、図—20に示すように写真共有サービスの技術の進歩は日進月歩であり、平成21年4月時点ではGoogle社のPicasaでは地図上に直接写真の表示が可能である。このように、技術の進歩が早い写真共有サービスのなかから、本システムに適しているものを選択するための、調査・選定方法の整理を行うことが必要である。



図—20 Picasaによる写真共有サービス

4.3 新技術による巡視の高度化

本研究では、漏水を検知するために各種の計測手法の適用性について検討を行い、その適用可能性について知見を得ることができた。

今後も引き続き、河川堤防の漏水メカニズムを考慮し、それを検知する技術の活用について検討を行う必要がある。

参考文献

- 1) 国土交通省国土技術政策総合研究所監修、水防ハンドブック編集委員会編：「実務者のための水防ハンドブック」、技法堂出版、2008.10
- 2) 建設工法協議会、全国水防管理団体連合会：「水防工法・技術がわかる水防工法ハンドブック」、建設工法協議会、全国水防管理団体連合会、2004.3

NEW AND EFFICIENT TECHNIQUES FOR FLOOD FIGHTING

Abstract : Flood fighters play an important role during floods. However, the decreasing number and the aging of the fighters can weaken its flood fighting force. This research focuses on the development of labor saving ringing and flood fighting information sharing system. The experiments for a piping detect technique using new technologies have also been carried out. The developed labor saving ringing can be built in 20 minutes with 2 fighters. The information sharing system efficiently uses a mobile phone and a photo sharing service, and can provides an cost effective and easy operating service.

Key words : flood fighter, flood fighting, piping (internal erosion), information sharing