

機関番号：12301

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2010

課題番号：20510174

研究課題名（和文）出水時における河川堤防の安全性診断システムの構築

研究課題名（英文）CONSTRUCTION OF HEALTH MONITORING SYSTEM OF RIVERBANK DURING FLOOD

研究代表者

松本 健作 (MATSUMOTO KENSAKU)

群馬大学・大学院工学研究科・助教

研究者番号：90302455

研究成果の概要（和文）：

河川堤防における現地観測および大型土砂崩壊実験によって、河川堤防の浸透性破壊に対する安全性診断システムの構築を行った。現地観測では加速度、地温および電位を計測することで、渡良瀬川堤防における漏水を特定することができ、国土交通省の調査とも符合する結果を得た。大型土砂崩壊実験でも崩壊の微弱な兆候を良好に検出できることが確認されたことから、堤体監視センサとして良好な感度を有していることが確認できた。

研究成果の概要（英文）：

A health monitoring system of riverbank during flood was constructed. Field measurement and large scale experiment was performed. In field measurement, acceleration, ground temperature and self potential were measured. Results of that indicated existence of leakage on the riverbank with good agreement. Results of Large scale experiment indicated that the sensor has good accuracy to get information of feeble indication of condition of riverbank.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2009年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2010年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
総計	3,300,000	990,000	4,290,000

研究分野：河川工学，防災工学

科研費の分科・細目：社会・安全システム科学・自然災害科学

キーワード：河川堤防，安全性診断，浸透性破壊，現地観測，加速度計測，地温探査，自然電位，大型土砂崩壊実験

1. 研究開始当初の背景

2004年に河川堤防の決壊を伴う水害が頻発したことを受け、我が国初の、全国一斉河川堤防の詳細点検が実施されたが、結果は、想定される破堤要因の数種の現象に限定しても、3割程度の堤防において安全性に疑問があると診断された。詳細点検は1km間隔断面で実施されたが、局所性が高い河川堤防の

調査としては十分な精度とはいえず、更にきめ細かく、安全性を診断することができる手法の確立が急がれている。

研究代表者は、2007年度までの取り組みにおいて、河川橋梁や河川堤防の出水時における加速度振動を計測することで、その振動特性から状態推定を行うための基礎的な取り組みを行い、出水時における河川橋梁の振動

特性から、出水時にリアルタイムで水位を推定できる可能性があることを示してきた。しかし、現地観測のデータ量が不足していること、また橋梁と異なり河川堤防は土構造物で内部構造が複雑で、その診断が困難であることなどの課題が残った。

2. 研究の目的

本研究では、上述のような背景をふまえ、河川堤防の安全性に資する状態推定を、実際の河川堤防にセンサを設置し、それによって得られる現地観測データを元に試みることにした。実堤防を対象とした現地観測において、破堤に関するデータを取得できる可能性は低いことが予想されるため、別途、破堤を模した実験を行うことで、破堤現象に対してどの程度感度を有しているかの検証を行い、且つ、破堤へと進行する過程における微弱な兆候を捉えることを試みることにした。

3. 研究の方法

現地観測は、渡良瀬川の実河川堤防の全川区間のうち、国土交通省関東地方整備局渡良瀬川河川事務所によって先行して実施された全国一斉河川堤防詳細点検によって、浸透性破壊に対する安全性に対して懸念があると診断された、30km地点左岸の川崎橋地先(以下、川崎サイトと呼ぶ)および右岸の福富町地先(以下、福富サイトと呼ぶ)を対象とすることとした。計測項目は加速度、地温、電位とし、それぞれ、微動アレー探査による地下構造の推定、1m深地温探査による流動地下水探査および自然電位法による流動地下水探査を実施した。計測は、1日もしくは2日で実施する比較的広範囲を対象とする計測と、5測点のみを選定し、高速同期法SS(Spread Spectrum)無線通信(以下、SS無線通信と呼ぶ)という独自の無線システムを使用した常時計測を実施した。SS無線通信は、その秘匿性と耐混信性に優れていることから、主に軍事目的に用いられてきたが、送信時に一旦信号をスペクトラム拡散した後、受信側で再構築する際に比較的情報量が多く必要となることなどに課題があった。本研究で用いたシステムでは、高速同期という新たな改良によって1億分の5ワットという極低電力での通信が可能となり、5分に1度の通信で、単1乾電池3個で年間を通じての計測体制を確立できた。電力供給やデータ送信の施設が不要であるため、今後の様々な野外観測における有効な計測システムを確立できたと考えている。

堤防の安全性診断を検討するに際し、本システムによる成果が、堤防破壊の最終的な形態である破堤時において、どの程度適用可能であるかを検討することは重要な要素であると考え、破堤を模した実験として、防災科

学技術研究所の大型降雨実験施設を用い、大規模土砂崩壊実験を行い、本研究で構築した種々のシステムの精度検証および有効性の確認を行った。幅4m、斜面長10m、斜面厚さ1m、傾斜角30°の大型斜面にまさ土を敷設し、良く締め固め、加速度、地温および電位センサを埋設し、各時系列データを取得した。斜面中央部にはネットに礫を充填することで高い透水性をもたせた人工の水ミチを設置し、堤体に漏水が存在する状況を想定した。人工水ミチには最大20l/minで斜面上部より通水し、また斜面には建屋上部より一様に50mm/hの強度で散水し、総通水量5.1088m³、総散水量169.15mmで、散水開始から3時間23分で崩壊となった。散水前から崩壊までの一連の土砂挙動を、各種センサによって計測された時系列データを用いて検討を行い、それら計測データから崩壊の挙動を捉えることができるか、ひいては、崩壊の余地につながる微弱な兆候を捉え、河川堤防の破堤診断について有用な知見を取得することができるかについて検討を行った。

4. 研究成果

(1) 現地観測

① 川崎サイト

川崎サイトでは、堤外地表法尻に沿った約100m区間について計測を行った。結果を図-1に示す。

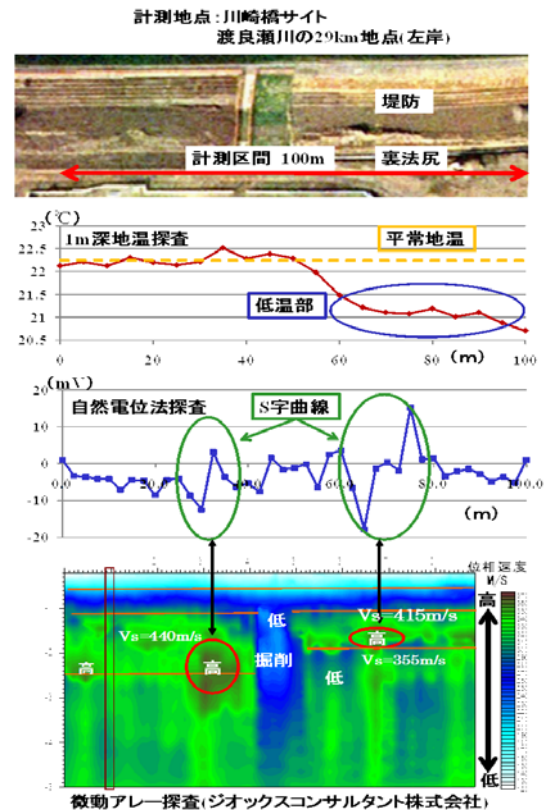


図-1 川崎サイトにおける現地観測結果

図-1は上から現地観測を行ったサイトの概観(川表法面の様子), 1m深地温探査, 自然電位法および微動アレー探査によるS波速度構造を示している. 各計測結果図は横軸が測線方向の距離であり, 最上段の写真における位置と対応している. 縦軸は上から順に, 1m深における地温(°C), 地表面電位差(mV)および深度(m)であり, 最下段の微動アレー探査の結果のみ, S波速度をスペクトル表記で示してある. 1m深地温探査の結果を見ると, 測線長60m付近から, 地温が低下していることが判る, 平常地温に比べ極端に低下していることから, 流動地下水, 本件の場合, 堤防基盤漏水が存在している可能性がある. 自然電位を見ると, 地温の計測結果と符合する60m付近に大きな反応があり, 一般的に用いられている±5mV以上の値と顕著なS字型の反応から, 同じく基盤漏水の存在が示唆される. 今一つ, 30m付近にも顕著な反応を見せているが, こちらは地温の結果には現れていない. 微動アレー探査の結果を見ると, S波速度が局所的に高くなっている領域があり, その存在域が, 地温の異常低下部および自然電位の顕著な変化部と一致していることが判る. 一般的に, 1m深地温探査の深度方向の適用範囲は15m程度であり, 一方の自然電位法の深度方向の適用範囲は最大30m程度と考えられている. 30m付近の自然電位および微動アレーの変化域に対して1m深地温に対応する計測結果が得られていない理由として, 30m付近の局所的な構造が, 微動アレーの結果からは深度30m程度の領域に存在するため, 自然電位法では感知したものの, 1m深地温探査では探知しなかった可能性があると考えられる. 河川堤防は最大でも深度15m程度の探査能があれば適用可能であるが, 基盤の場合, 異常の存在域は30m以深である可能性も考えられるため, 実用にあたっては留意する必要がある. 1m深地温探査, 自然電位法および微動アレー探査の結果は概ね良好に符合する結果となり, これら異なる探査原理に基づく物理探査において同一の傾向を示す領域が漏水が発生している可能性が高いと判断することができる.

② 福富サイト

福富サイトは, 前述の川崎サイトの対岸, 渡良瀬川30km付近右岸側の福富町地先の約800m区間である. ここの同じく詳細点検の結果, 浸透性破壊に対して懸念があると診断された区間である. 図-2に福富サイトにおける現地観測結果を示す. 福富サイトでは, 堤体を挟んで, 堤内および堤外において探査を行い, 堤防を横断する漏水の検知について検証を行った. 図-2は上から, 堤外地における1m深地温探査の結果, 当該区間にお

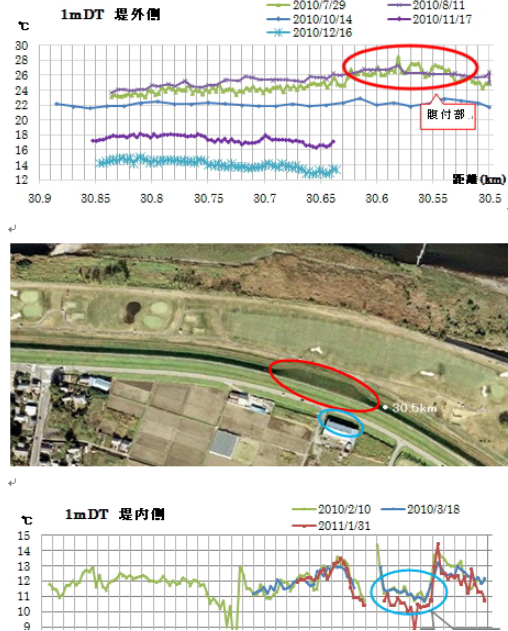


図-2 福富サイトにおける現地観測結果

る渡良瀬川右岸堤防の概観および堤内地における1m深地温探査の結果をそれぞれ示す. 堤外地における探査結果は, 8月から12月といった, 夏季および冬季を含む多様な季節における探査を行っている. 結果を見ると, 28度から12度程度にまで, 平常地温が季節性的の変動を示していることが判り, その変動の上に, 漏水によるものと思われる局所的な温度変動帯を散見させている. 不易層における地温が地下水温とほぼ等しくなる秋季のデータを見ると, 22度付近でほぼ一定値を示している様子が見取れ, 定性的にみても良好に不易層地温を計測できていることが判る. 図中丸印を付記した30.6~30.5km付近では地温がかなり高温を示している. これらは夏季における計測であり, もし漏水による温度変化である場合には異常低温として検出されるはずであるため, これについては漏水とは異なる理由が考えられる. 中図の航空写真による堤体形状を見ると, 当該区間においては堤体に腹付が為されており, 位置関係がほぼ一致していることから, この腹付による人工的な施工状況の差異から出た結果である可能性が高いと考えられる. その他区間については, 多少の変動はあるものの, 顕著な温度異常と見做せる区間は検出されていないように見える. 一方で, 堤内地における探査結果を見ると, 30.65kmおよび30.55km付近を中心として, 異常高温が検出されている. これらは冬季における探査結果であるので, 漏水が存在する場合は高温帯として検出されることを考慮すると, これら区間において堤防基盤漏水が発生している可能性が高い. 30.6kmおよび30.7km付近にも顕著な温度異

常帯が見られるが、これらは測線を横断する形でアスファルト道路が存在するため、外乱の影響で温度異常が発生している可能性が高いため、ここでは検討に加えないことにする。それら区間を除くと、堤内地における30.75kmより上流側では地温がほとんど変化していない。図には示していないが、これは、渡良瀬川河川事務所によって先行して実施された詳細点検の結果と符合する結果であり、一定の精度を有している可能性が高いことを示すことができた。最終的には、1m深地温探查の結果を元に、実際にボーリングを掘って検証を行うことが望ましいが、それらは今後の課題とする。

(2) 大型斜面崩壊実験

現地観測によって破堤場における計測結果を得ることは現実的には困難であるため、破堤状態を模した、大型土砂崩壊実験を行った。実験は(独)防災科学技術研究所の大型降雨実験施設によって実施した。写真-1に、実験斜面の概観とセンサ設置状況を示す。斜面は幅4m、斜面長10m、土槽厚1mで傾斜は30度である。まさ土を斜面に均等に設置した後、建屋上部より先行散水を行い、土中の体積含水率をほぼ一定に保ってから実験を行った。なお斜面中央底部にはスチール製の網状パイプ内に礫を充填し、透水係数の高い人工の水ミチを設置して、斜面内に漏水を模した水ミチが存在する状況下における土砂崩壊現象について、特性検証およびセンサの感度について検討を行うこととした。斜面には、MEMS型加速度傾斜計(斜面中央部の黒丸)を5測点、地温センサ(斜面方向3列の赤逆三角形)を18測点および自然電位計測用酸化鉛電極(斜面方向2列の黄丸)12測点を設置した。なお、電位計測用電極については斜面向かって左下部に、グランド値計測用にもう1点設置してある。表-1に、崩壊実験における散水・通水の条件を示す。総通水量5.1088 m³、総散水量169.15mm、散水開始から3時間23分で崩壊した。ただし、斜面下部には開閉可能な水受け構造が有り、定常的な流出状態にある。上部からの通水は下部からの流出を考慮した無限斜面想定用のものである。写真-2に、崩壊後の様子を示す。

図-3に地温の計測結果を示す。横軸が時間(dd:hh:mm:ss)、縦軸が温度(°C)である。ch4,5,6センサによる計測結果であり、それぞれの設置位置は、斜面上から2段目の行の、それぞれ左、中央および右である。図中に付した①、②および③は、それぞれ通水開始、散水開始および通水量増加の各時刻を示している。図を見ると、③の時刻辺りまでは地温は一定、もしくは遁減といった状況であるが、③以降上昇している。これは通水および

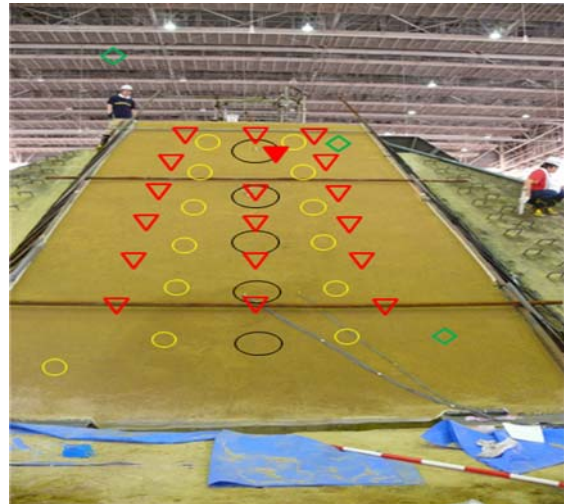


写真-1 大型崩壊実験斜面の概観

表-1 崩壊実験経過(2010年7月)

日時	経過	通水流量・散水量
9日, 20:30~	通水	1ℓ/min
10日, 14:00		
12日, 10:00	通水	10ℓ/min
12日, 11:00	通水 散水	10ℓ/min 50mm/h
12日, 12:00	通水 散水	20ℓ/min 50mm/h
12日, 14:23	崩壊	



写真-2 崩壊後の実験斜面

散水に用いた実験用水が貯蔵タンク内部で温度勾配を有している状況であったためであり、崩壊現象そのものとは直接関係しない。このため、散水開始から崩壊までの温度の経

時変化に関する考察を行うことが難しいが、同時刻においては同水温の通水・散水が為されたことを考えれば、各時刻におけるセンサ間の相違については考察可能であると思われる。図を見ると、斜面中央に設置した ch5 における地温のみが実験中のほぼ全ての時刻において左右の計測結果と比較すると 1.5℃程度低くなっていることが見て取れる。100 分の 1 精度の温度センサを用いているため、この 1.5℃の温度差は有意な差として捉えることができるものと考えられる。ch5 は斜面中央部にあるため、斜面底部に高透過性部として設定した人工の水ミチの直上に存在し、その冷却効果によって中央部の地温が低下したものと考えられる。図示はしていないが、この傾向は他断面においても同様に見られ、本研究に用いた温度計測システムが、土中の局所的な水ミチを感知できる精度を有していることを確認することができた。

図 - 4 に、崩壊場において計測された自然電位の経時変化を示す。横軸は同じく時間であり、縦軸が電位 (mV) である。図中の①～③の表記は図 - 3 と同様である。図を見ると、通水の開始による電位の変化は見られず、②の散水開始に伴って急激に電位低下が起こっていることが判る。この傾向は、斜面の全位置における電位センサの計測結果からも同様な特徴が確認できている。よって本実験条件では、電位変化による土中の水ミチ検知はできなかったものの、散水による土中水分の変化を電位によって捉える事ができたものと考えられる。散水によって低下した電位は極小値をとった後、僅かに上昇して定常状態となりそのまま崩壊に至る。この挙動も、他 ch における計測結果のほとんど全てで確認しており、散水を伴う土砂崩壊場における自然電位の特徴的な挙動であると考えられる。自然電位は、その基礎原理はシンプルではあるが、実現象場においては様々な要因が複合した複雑な特性を示すことが知られており、今回の一連の電位挙動も現象との関連性による解明が充分出来ておらず、これらは今後の課題である。しかしながら、再現性の有る有意な挙動であることは確認できたため、この情報を工学的に活用する検討を行うことについては可能性を示すことができた。

図 - 5 は、崩壊場における MEMS 型加速度式傾斜計(上図)と自然電位(下図)の経時変化である。傾斜計図の横軸は時間であり、下図の電位の時間と位置を合わせてある。縦軸は加速度 (gal) であり、静的感度を有していることから、重力加速度成分の変化を表している。この変化がセンサの傾斜を意味し、本実験では設置した斜面の変形を検知しているものと捉えて考察を行う。図 - 5 を見ると、傾斜計の値が大きく変化する約 1 時間前から電位

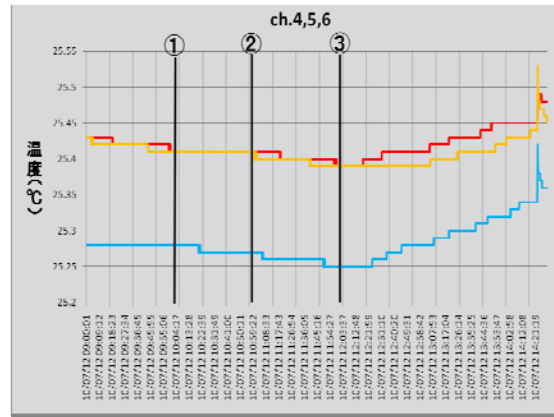


図-3 温度の経時変化(ch4, 5, 6)

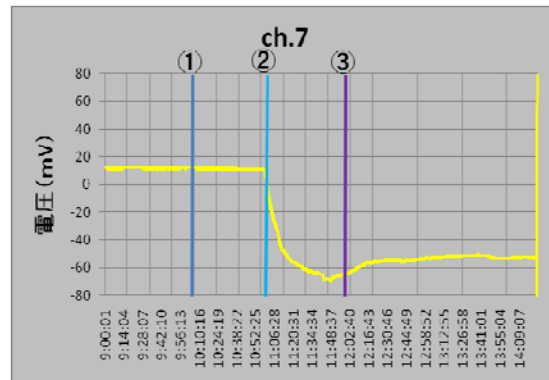


図-4 自然電位の経時変化(ch7)

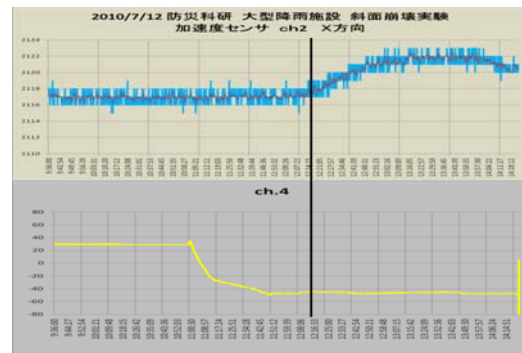


図-5 傾斜計と電位の経時変化

の急激な低下がみられており、土砂崩壊の早期予測に資する情報として活用できる可能性があることを確認することができた。加速度計測データについては、別途、時系列解析および WAVELET 解析も行い、出来るだけ早期に崩壊の微弱な兆候を検出するためのお試みを行ったが、最大で崩壊に 20 分前程度であった。自然電位による監視が土砂崩壊に関連した土砂の挙動とどのような相関性があるのか、現時点では十分なデータの蓄積が無いためはっきりとしたことは言えないが、こ

れらメカニズムの解明と、早期予測システムの開発にとって、本研究の知見は有用なものであると思われる。河川堤防の破堤に関する早期予測システムが構築できれば、その情報に基づく洪水氾濫シミュレーションを行い、リアルタイムで周辺住民に避難関連情報を提供できることにあるため、極めて意義がある。今後は、実堤防での実測データに加え、破堤実験による検証を更に進める必要がある。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計2件)

- ① 松本健作, 岡田崇, 竹内篤雄, 矢澤正人, 内堀寿美男, 清水義彦, 自然電位法による堤防基盤漏水特性の把握とその有効性の検討, 水工学論文集, 査読有, 第55巻, 2011, CD-ROM.
- ② 岡田崇, 松本健作, 竹内篤雄, 玉置晴朗, 矢澤正人, 内堀寿美男, 瀬間武, 清水義彦, 1m深地温探査を用いた渡良瀬川基盤漏水の常時監視による流動地下水特性の考察, 河川技術論文集, 査読有, 第16集, 2010, pp. 341-346

[学会発表] (計3件)

- ① 岡田崇, 松本健作, 竹内篤雄, 林久夫, 矢澤正人, 水落幸広, 流動地下水特性を利用した河川堤防の安全性の1次診断手法の開発に関する研究, 平成22年度日本応用地質学会研究発表会公園論文集, 2010. 10. 21, pp. 233-234, 島根県民会館(島根県)
- ② 岡田崇, 松本健作, 宋東烈, 菅正信, ARMAモデルによる出水時における河川構造物の状態推定に関する研究, 第59回理論応用力学講演会概要集, 2010. 6. 10, pp. 123-124, 日本学術会議(東京都)
- ③ 岡田崇, 松本健作, 竹澤弘久, 竹内篤雄, 玉置晴朗, 矢澤正人, 名倉裕, 内堀寿美男, 瀬間武, 清水義彦, 自然電位法による河川堤防の浸透水探査に関する研究, 平成22年度砂防学会研究発表会概要集, 2010. 5. 27, 長野県社会福祉センター(長野県)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

松本 健作 (MATSUMOTO KENSAKU)
群馬大学・大学院工学研究科・助教
研究者番号：90302455