

肱川阿蔵箇所での牽引式電気探査を用いた 堤防の浸透に対する弱部抽出事例

大洲河川国道事務所 工務第一課 河川工務係員 田内 敬祐
大洲河川国道事務所 工務第一課長 三國 宣仁

平成30年7月豪雨において、一級河川肱川の阿蔵箇所ではパイピング現象が発生し、裏法の陥没や、堤内地で激しい噴砂などの被害が確認された。その後、被災箇所対策を完了したが、既往の点検では被災箇所を含む一連区間において、パイピング破壊は生じない結果であったため、残区間において対策必要性の早急な把握が課題とされた。そこで本稿では、対策完了箇所の下流区間において牽引式電気探査を実施し、その結果を反映した地盤モデルから再検討を行った結果を報告する。

キーワード 堤防、浸透、パイピング、牽引式電気探査

1. はじめに

大洲河川国道事務所が管理する一級河川肱川では、平成30年7月豪雨で阿蔵箇所においてパイピング被害が発生し、破堤には至らないまでも、裏法の陥没・ずれ下がりや、堤内地での激しい噴砂が発生し、非常に危険な状態であった。これを受けて大洲河川国道事務所では、被災直後から中型動的コーン貫入試験による水ミチ調査や漏水原因把握のための堤防開削調査を実施した。その結果、被災箇所は、旧河道を利用した大洲城のお堀の埋土部に位置し、砂礫層の上の砂層で吸出しが生じるなど、堤防直下および背後地の地盤構造によってパイピング被害が生じていたことが明らかとなった。その後、基盤漏水防止のために遮水矢板を施工し、対策工事を完了したが、被災箇所を含む一連区間において、既往点検時は、パイピング破壊が生じない結果であったため、残区間においても対策の要否を把握する必要があった。実際に、被災箇所から150m下流の区間でも小規模な噴砂が発生しており、点検結果と実現象の乖離が生じている。

そこで、本稿では、平成30年7月豪雨の際、小規模の漏水被害が発生した下流区間において牽引式電気探査を実施し、堤防背後地の表層地盤構造を反映した地盤モデルから再検討を行った結果を報告する。

図-1に、平成30年7月豪雨の被災箇所・対策範囲および本調査範囲を示す。

2. 河川堤防のパイピング

河川堤防のパイピングは、上昇した外水の水圧による川裏法尻付近の漏水や噴砂をきっかけとし、堤体あるいは基礎地盤内の土が徐々に噴砂孔から排出されることによって、パイプ状の空洞が川裏側から川表側に向かって

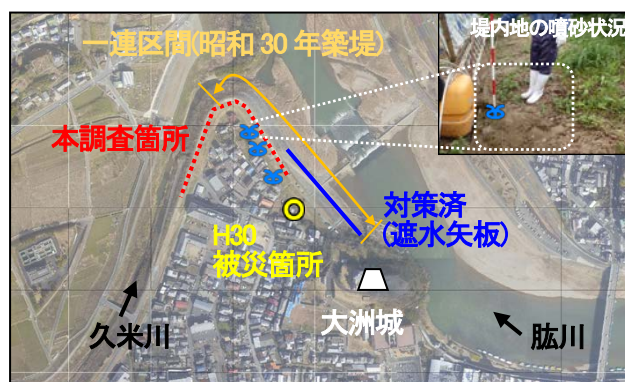


図-1 平成30年7月豪雨の被災箇所（阿蔵箇所）

進展する現象である。パイプが川表側まで貫通すると同時に、大量の水が流れ、パイプを急激に拡大させる。それにより安定を失った堤体が沈下・陥没し、最終的には破堤に至るものと考えられている¹⁾。わが国では、平成24年の矢部川堤防などの数事例が知られている²⁾。

近年の研究結果³⁾では、パイピング発生要因の着眼点として、次の3つが挙げられており、堤内地の表層2～4mの地盤構造を詳細に把握することが重要である。図-2に、パイピングの発生しやすい地盤構造を示す。

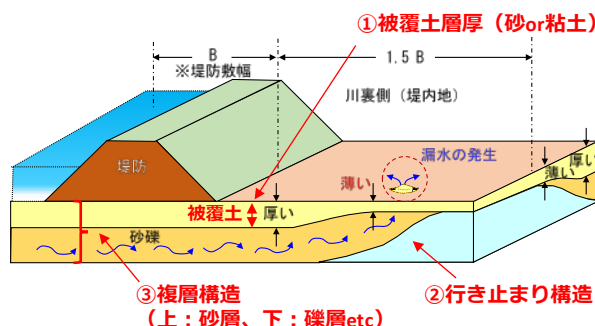


図-2 パイピングが発生しやすい地盤構造

①被覆土層厚：パイピングは、被覆土層厚が相対的に薄くなる箇所が生じやすく、被覆土層厚が3m未満の場合は、発生の危険性が高い。②行き止まり構造：川表側から透水層を通して供給された水が、川裏側に分布する粘性土などの行き止まり地盤によって堰上げられることで噴砂を伴う漏水が発生する。堤防敷幅に対して、裏法尻から1.5倍の範囲に行き止まり構造がある場合はパイピングの危険性が高くなる。③複層構造：基礎地盤が透水性の異なる複層からなり、かつ上層に対し下層の透水性が高い場合（上層が砂層で下層が砂礫層等の場合）にパイピングが生じやすい。

3. 牽引式電気探査

(1) 調査目的

堤防弱部を効率的に把握するためには、堤内地において深度2~4m程度の浅部地盤構造の把握が重要である。堤内地は民有地であることが多いため、調査を行う場合は、非破壊調査である物理探査が望ましい。本調査では、牽引式電気探査を適用した。

牽引式電気探査は、被覆土層厚が相対的に薄い箇所、旧河道等の要注意地形の分布、行き止まり構造および複層構造を比抵抗値により連続的に把握することを目的として実施した。また、牽引式電気探査結果の精度を確認するため、堤防法尻部において簡易ボーリングによる試料採取を行い、基礎地盤表層部の土質構成を把握した。

(2) 探査手法の特長

図-3に、使用した牽引式電気探査の測定機器および測定状況を示す。

電気探査は、土の含水状態や地下水の有無によって電気の流れ易さが異なることを利用し、地盤構造および土質構成を推定する調査手法である⁴⁾。電気探査で得られる物性値は地盤の比抵抗であり、高比抵抗は電気を通しにくいことを意味する。地下水位が浅では特殊な場合を除いて、粘土、砂、礫の順に比抵抗が高くなる。従来から利用されてきた電気探査は、地盤に金属製の電極棒を多数設置する必要があるが、長大な河川堤防を縦断方向に測定するには、測定時間の長さが課題であった。使用した牽引式電気探査は、「キャパシタ電極」と呼ばれる探査原理に基づいており、地盤に直接電極を打設せずに電流を流して測定を行うことができる方法であり、測定効率が飛躍的に向上している。さらに今回使用した測定機器は、深度2m以浅の構造把握に特化した「改良版」を併用した。



図-3 測定機器および測定状況

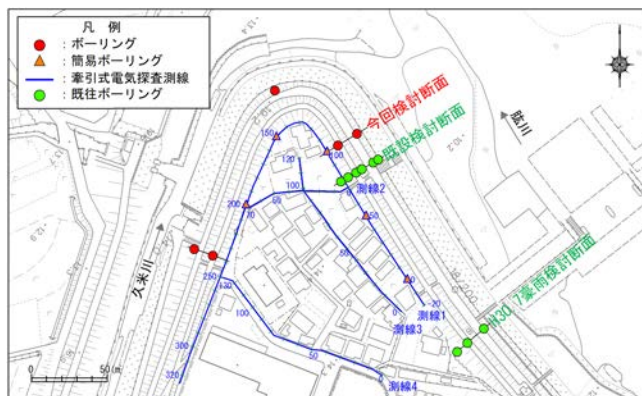


図-4 調査位置平面図

(3) 調査位置および測線

図-4に、調査位置平面図を示した。牽引式電気探査は、川裏法尻の堤防縦断方向（測線1：-20m~320m）、堤内地の堤防横断方向（測線2：0m~70m）、堤内地の堤防縦断方向（測線3：0m~120m）、（測線4：0m~140m）の計4測線で実施した。簡易ボーリングは、川裏法尻の測線1沿いに50m間隔 計5箇所を実施した。

(4) 調査結果（検討断面位置の決定）

図-5に、牽引式電気探査結果および簡易ボーリング調査結果を示す。牽引式電気探査より得られる比抵抗値は、高比抵抗ほど礫質土を示し、低比抵抗ほど粘性土を示す。簡易ボーリングは、礫質土・砂質土・粘性土に区分した。

測線1は、距離程-20m~200m間（肱川側~合流部）で、表層から粘性土が層厚1.5~3m程度で分布し、その層厚は距離程100mで、被覆土層が1.5mともっとも薄くなる。既往検討断面位置（距離程80m）では、被覆土層は2m程度を示す。距離程220m~250m間の高比抵抗値は、樋門および地下埋設管の影響を受けている。

測線2~4は、堤内民地の歩道上での測定となる。GL-2m以浅は、地下埋設管の影響を受け、比抵抗値が高い。

測線2の堤防横断測線は、距離程0m~40m付近まではGL-3m以深で高比抵抗値を示し礫質土が分布するが、距離程40~70mではGL-2m以深で低比抵抗値を示し、粘性土が厚くなる。測線2の距離程30mと測線3の距離程100mは、牽引式電気探査が交差する地点であるが、GL-3m以深で高比抵抗値を示し、同様な結果が得られている。

検討断面位置は、被覆土層が1.5m程度ともっとも薄くなる測線1 距離程100mとし、堤防川表法肩部および川裏小段部においてボーリング調査を実施し、堤体内および基礎地盤の地層構成を詳細に調査した。

(5) 検討断面の比較

図-6に、今回検討断面図、既往検討断面図を示した。調査地の堤体土質は、礫質土が主体である。基礎地盤は、堤体土直下に粘性土および砂質土が薄層状に分布し、以深は砂礫層が15m程度と厚く堆積する。

牽引式電気探査で2m程度の被覆土層厚が確認され

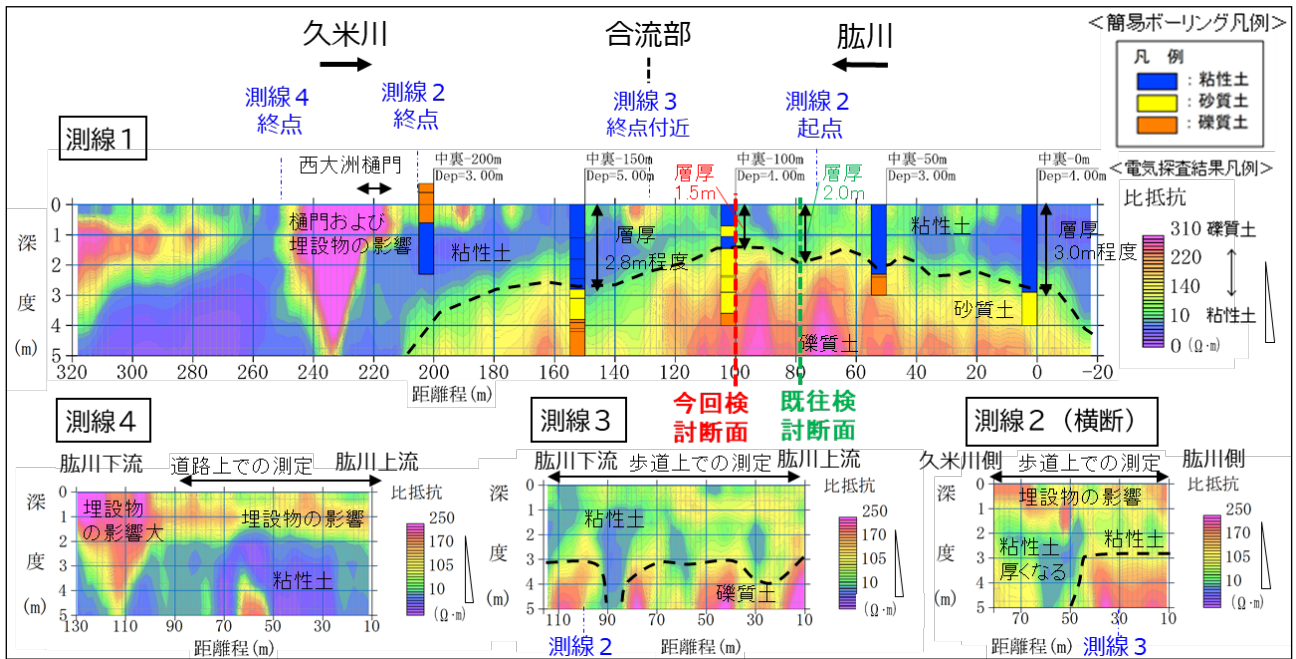


図-5 牽引式電気探査結果および簡易ボーリング調査結果

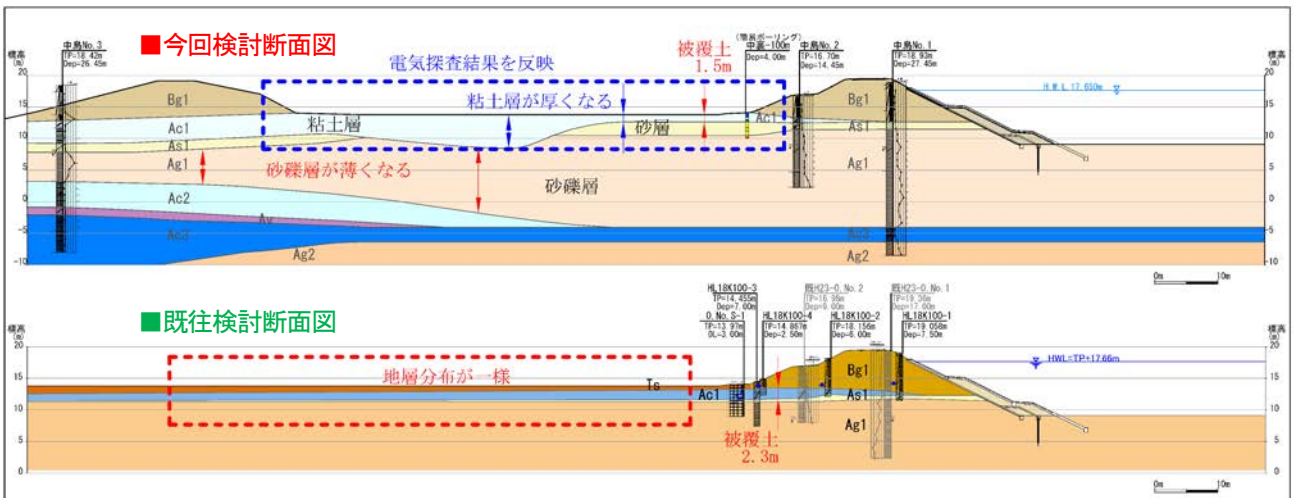


図-6 電気探査結果を反映した検討断面図および既往検討断面

た既往検討断面の被覆土層厚は、平成23年に行ったサウンディング調査で2.3mであったのに対し、今回検討断面では簡易ボーリングの結果1.5mであり、今回検討断面は、既往検討断面と比較して被覆土層が薄い。

また、今回検討断面には、堤内地での牽引式電気探査結果および久米川側のボーリング調査結果を反映し、堤内地の地層構成を検討した。行き止まり構造とまではいかないが、堤内地側にしがいが被覆土層が厚く、高透水層の層厚が薄くなる地層状況であり、既往検討断面のような一様分布よりも水はけが悪いと考えられる。

4. 浸透流解析

牽引式電気探査及び簡易ボーリングの結果より明らかになった表層地盤モデルをもとに浸透流解析を実施した。

(1) 土質定数

表-1に、浸透流解析に用いた各層の飽和透水係数及び不飽和浸透特性を示す。地下水位が浅に位置する堤体

(Bg1)については室内透水試験、地下水位以深に位置する基礎地盤については現場透水試験より飽和透水係数を設定した。また、不飽和浸透特性は河川堤防の構造検討の手引き（以下、手引き）にある一般値⁵⁾を用いた。今回検討断面で設定した各定数は、既往検討断面と同様の値を用いた。

表-1 各層の土質定数

| 地層 | 土質 | 飽和透水係数 | | 不飽和浸透特性 |
|-----|-----|-----------|----------|----------|
| | | k (m/sec) | 備考 | |
| Bg1 | 礫質土 | 2.0E-04 | 室内透水試験 | 手引き（礫質土） |
| Ac1 | 粘性土 | 1.0E-06 | 現場透水試験 | 手引き（粘性土） |
| As1 | 砂質土 | 1.0E-04 | 現場透水試験 | 手引き（砂質土） |
| Ag1 | 礫質土 | 6.0E-04 | 現場透水試験 | 手引き（礫質土） |
| Ac3 | 粘性土 | 1.0E-07 | 手引き（粘性土） | 手引き（粘性土） |
| Ag2 | 砂質土 | 6.0E-04 | 現場透水試験 | 手引き（砂質土） |

(2) 解析結果

図-7に、解析から得られたピーク水位時の浸潤線及び流速ベクトルを示す。

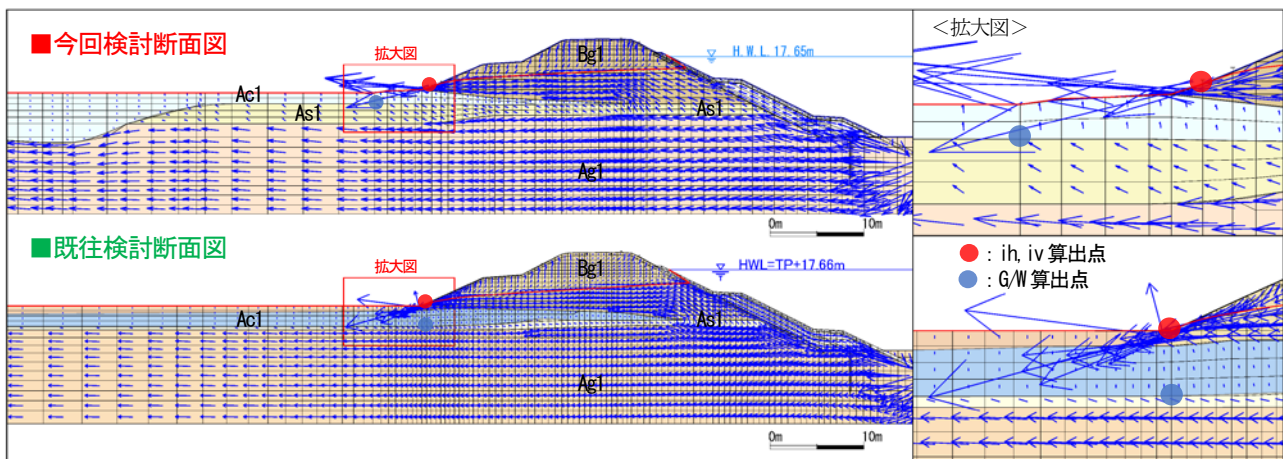


図-7 電気探査結果を反映した検討断面図および既往検討断面

ここで、上図が今回検討断面、下図が既往検討断面の結果である。同図には、局所動水勾配及び盤膨れ指数G/W（Gは被覆土層の重量、Wは被覆土層底面に作用する揚圧力で、G/Wが1以下で盤膨れが生じるものとみなす）の評価箇所を示している。降雨及び外水位は手引きに準拠し計画高水位での照査外力を設定した。

表-2に、安全照査結果の比較表を示す。川表には既設の遮水シートがあるため堤体には直接河川水は入らないが、基礎地盤の砂礫層（Ag1層）から入った河川水は、砂礫層や砂層を通して川裏側へ浸透する。既往検討断面ではG/W=1.03>1となりパイピング破壊が生じない結果となっているが、今回検討断面では、既往断面に比べ被覆土が薄いうえに、背後地の被覆土が厚く、高透水層の砂礫も薄く漸移するためG/W=0.80<1となり、パイピング破壊が生じる解析結果が得られ、実現象と整合的な結果となっている。

表-2 安全性照査結果の比較

| 評価項目 | | 今回検討断面 | | 既往検討断面 | | 判定基準 |
|--------------|--------|--------|----|--------|----|---------|
| 局所動水勾配 | 鉛直(iv) | - | - | 0.23 | OK | ic<0.5 |
| | 水平(ih) | 0.34 | OK | 0.43 | OK | |
| 盤ぶくれ指数 (G/W) | | 0.80 | NG | 1.03 | OK | G/W>1.0 |
| すべり破壊 (Fs) | 裏のり | 1.73 | OK | 1.71 | OK | Fs≥1.45 |
| | 表のり | 1.26 | OK | 1.10 | OK | Fs≥1.00 |

5. まとめ

牽引式電探査を実施し、浸透に対する詳細点検の再評価によって判明した事項を以下に整理する。

- ・従来の浸透点検は、概略点検結果等により設定される一連区間から、堤防形状や堤内地盤高等のデータを用いて、浸透に対して相対的に危険な箇所を代表断面と設定して、詳細点検を実施している。
- ・今回、牽引式電気探査を用いて堤防縦断方向の調査を行ったことで、被覆土の層厚変化を連続的に把握することができた。
- ・その結果、被覆土の層厚はわずか200mの区間内でも

1.5～3m程度で変化することを確認した。

- ・また、堤防横断方向の調査により、行き止まり構造とまではいかないが、堤内地側にしたがって被覆土層の層厚が厚くなる状況も把握できた。
- ・被覆土層厚が薄い箇所、堤防の浸透に対する安全性検討を再検討した結果、盤ぶくれ指数（G/W）において基準値を満足しない結果が得られた。
- ・従来の代表断面の設定方法では、本ケースのように、浸透に対して最も危険な箇所を抽出できていない可能性がある。

6. おわりに

肱川の直轄管理区間においては、河川激甚災害対策特別緊急事業により、6箇所の築堤、9箇所の暫定堤高上げが令和5年度までに整備される予定である。流下能力が増強される一方、これまでよりも河川水位が上昇するため、パイピングなどのリスクが大きくなる。リスクの見落としを防止するために、今後、本事務所においては激特事業箇所を含む一連の区間において本手法を用いた調査を行い、堤防弱部の早急な把握を順次行う予定である。

謝辞：本調査の実施に当たり、多くのご助言を頂いた愛媛大学大学院理工学研究科 生産環境工学専攻教授の岡村未対氏に深謝の意を表す。

参考文献

- 1) 田中秀岳, 笹岡信吾, 下津隆介, 福島雅紀. 河川堤防基礎地盤におけるパイピング進行評価の検討. 第6回河川堤防技術シンポジウム論文集, p.29-32, 2018,
- 2) 矢部川堤防調査委員会: 矢部川堤防調査委員会報告, 2013
- 3) 国土交通省 河川技術研究開発制度 河川技術分野: 透水性基礎地盤を有する河川堤防の進行性破壊を考慮した総合的安全性点検のための評価手法と破壊抑制に関する技術研究開発, 2018
- 4) 小西千里, 山下善弘, 倉田大輔, 新清晃: シリンダー電気牽引式電気探査による浅部地盤調査, 地盤工学会誌, pp.20-23, 2020
- 5) 財団法人国土技術研究センター: 河川堤防の構造検討の手引き, 2012