

電気探査結果を活用した堤防の浸透に対する安全性の照査事例

那賀川河川事務所 調査課 係員 越智 晴香
那賀川河川事務所 工務課 課長 三國 宣仁
那賀川河川事務所 工務課 係長 山崎 久美子

那賀川左岸の大京原箇所においては、漏水対策後も漏水現象が発生している。そこで、堤内地の広範囲で牽引式電気探査を実施し、漏水原因となる堤内地側の基礎地盤構造を明らかにするとともに浸透流解析を実施した。電気探査の結果、堤防から離れたところに被覆土層が厚く分布する行き止まり構造が確認され、それを反映した浸透流解析の結果は、既設の漏水対策では必要安全率を満足しないことが確認できた。今回の検討より、堤防付近に行き止まり構造が分布する場合は、堤防の安全性に与える影響が大きいことが証明され、今後は堤内地側での詳細な調査から基礎地盤構造を明らかにした上で堤防のモデル化を行い、堤防の安全性の照査を実施することが重要であると考ええる。

キーワード 堤防, 浸透, パイピング, 牽引式電気探査, 漏水

1. はじめに

那賀川河川事務所が管理する一級河川那賀川の大京原箇所においては、平成16年8月台風10号で漏水被害が発生した。当該箇所は、地形的にも氾濫平野であり、要注意地形である旧河道上に位置する。

その後、当該箇所の浸透流解析を実施し、一連区間において、対策工事を実施した。堤体漏水対策として、断面拡大、表法面遮水、基盤漏水対策としてをブランケットを実施した。しかしながら、その後もパイピングと見られる漏水が繰り返し発生していることから、堤防の老朽化やみずみちの拡大が懸念されるため、対策を実施した一連区間において、既設漏水対策に対する妥当性を再度確認する必要があった。

そこで、本稿では、漏水が繰り返し発生している大京原箇所において、堤内地の牽引式電気探査を実施し、堤内地の地盤構造を反映した地盤モデルの再検討を行ない、浸透流解析から既設漏水対策工の妥当性を検討した。図-1に既往の漏水箇所・大京原箇所の既設漏水対策範囲を示す。

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。

近年の研究成果²⁾では、パイピング発生要因の新たな着眼点として、次の3つが挙げられている。図-2に、パイピングの発生しやすい地盤構造を示す。

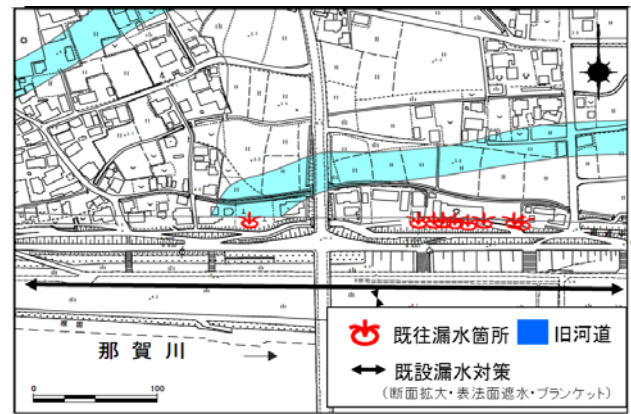


図-1 既往の漏水箇所
大京原箇所の既設漏水対策範囲

2. 河川堤防のパイピング

河川堤防のパイピング現象は、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。

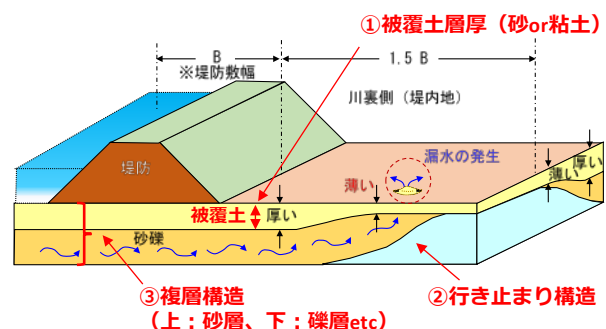


図-2 パイピングの発生しやすい地盤構造

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。

以上の3点がパイピングが発生しやすい要因であり、いずれも堤内地浅部の地盤構造を詳細に把握することが重要である。そのため、今回の調査では、牽引式電気探査及び簡易ボーリングにて堤内の地盤調査を実施した。

ため、横断方向の測線は堤防敷幅の1.5倍程度の範囲を目途に計画した。

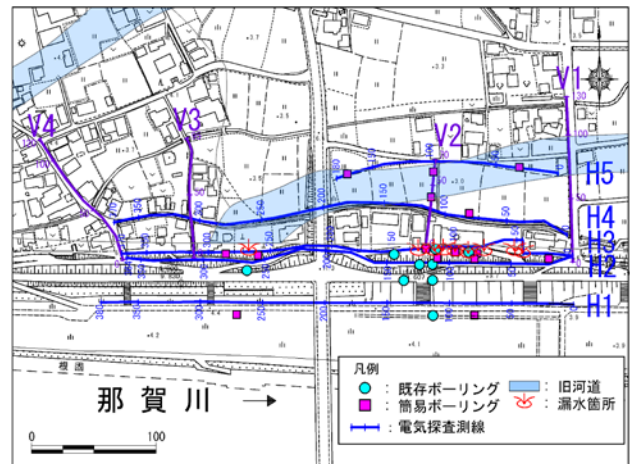


図-3 調査位置平面図及び測線

3. 牽引式電気探査結果

(1) 目的

対策工事を実施しているにもかかわらず、漏水が発生している状況に対し、まずは堤体及び堤内地での連続的な地盤状況を把握し、漏水発生の原因を明らかにする必要があります。パイピングは浅部の地盤構造と関係するため、表層の分解能が高くパイピングに特化した牽引式電気探査を適用した。

当該箇所は旧河道の要注意地形が分布しており、行き止まり構造等のパイピングが発生しやすい地盤構造となっている可能性があるため、比抵抗値により地盤構造を連続的に把握することを目的として実施した。さらに、簡易ボーリングを行い牽引式電気探査結果の精度の確認を行うために、結果を反映した解析モデルの作成、浸透流解析及び安定計算により既設漏水対策工の妥当性の検証を行った。

(2) 検査手法

牽引式電気探査でパイピングで重要とされている浅部の地盤情報を把握するため、通常よりも表層の分解能が高い改良版オームマップを計画した。

簡易ボーリングは牽引式電気探査に当該地における比抵抗値と地盤材料の相関を確認するために計画した。本調査では仮設が不要で浅部であれば一度に多地点での調査可能な打撃式簡易ボーリングを実施した。

(3) 調査位置及び測線

調査位置平面図及び測線を図-3に示す。測線は、過去に漏水実績のある箇所を中心に、堤防上と堤内地側の様子を面的に把握できよう配置した。なお、パイピングは法尻から堤防敷幅の1.5倍程度の浅部に行き止まり構造が分布する場合に特に発生しやすいといわれている

(4) 牽引式電気探査による想定地質区分

図-4に牽引式電気探査結果及び簡易ボーリング調査結果（想定地質区分）を示す。牽引式電気探査で得られる比抵抗値は礫っぽいほど高比抵抗、粘土っぽいほど低比抵抗の値を示す。川裏法尻付近のH2測線では、電気探査の結果、基礎地盤は相対的に高い比抵抗値が得られているため、礫質土からなり、これは簡易ボーリング結果とも一致する。また、H5測線の破線四角で囲む箇所の比抵抗値の小さな区間では、簡易ボーリングにおいても表層から粘性土、その下に細粒分の多い砂質土が分布しており、比抵抗値とも概ね一致する。このように電気探査結果を用いた推定地層に加えて、簡易ボーリングも同時に実施することで他箇所においても地盤構造を正確に把握し、想定地質区分を示した。

図-4に示す想定地質区分では、H2測線にて砂礫層が分布している。一方で、少し堤内地を縦断するH4測線では、ボックスカルバートより上流側（実線丸）において、電気探査の結果で低比抵抗を示しており、粘土層及び砂層が分布していることが分かる。また、H5測線では破線四角で囲む箇所において、粘土層や細粒分を多く含む砂層が表層から3m以上と厚く分布しておおり、簡易ボーリングでも同様の地質が確認されている。いずれも、行き止まりのような構造を示している。横断方向のV2測線では旧河道より堤内側（破線四角）において、低比抵抗を示し、粘性土や砂質土が厚く堆積する行き止まりのような構造を示している。

(5) 漏水の発生原因（素因）

漏水が発生する箇所は、前節で示した調査結果から周辺地盤に比べ比抵抗値が高い箇所であり、特に図-4に示すH2測線の破線丸区間がみずみちとなり堤防法尻からの漏水が発生しているものと考えられる。なお、破線

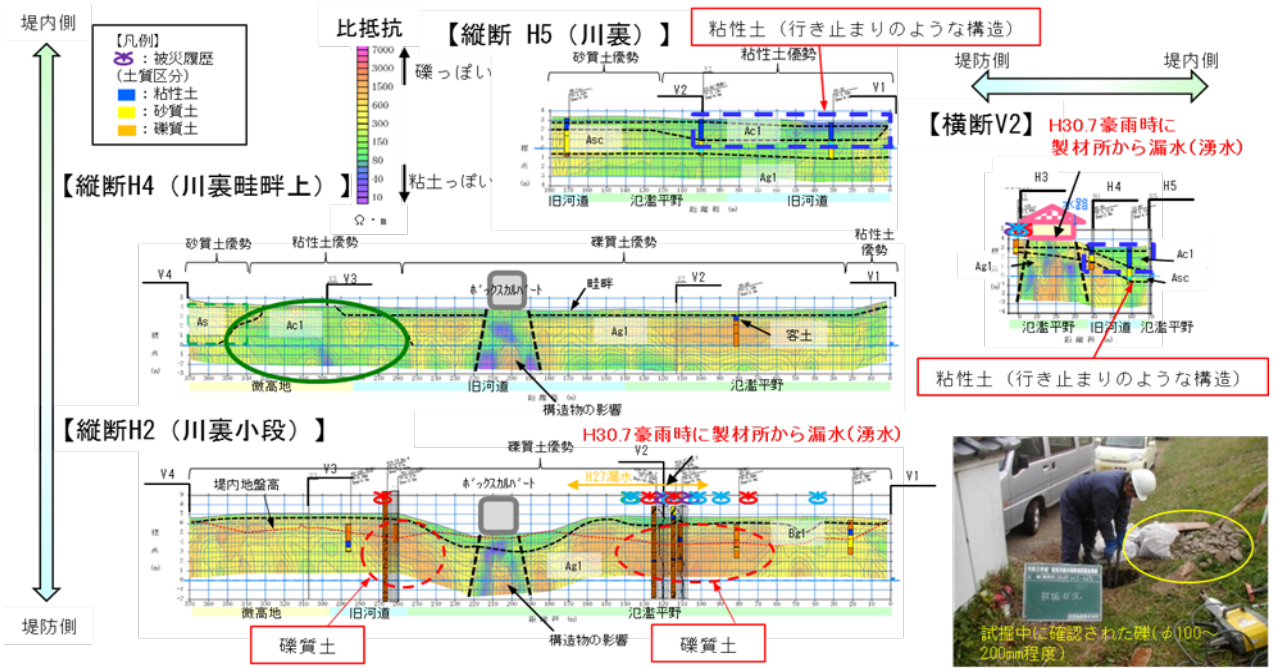


図-4 牽引式電気探査及び簡易ボーリングの結果 (想定地質区分)

写真-1 試掘結果 (玉石)

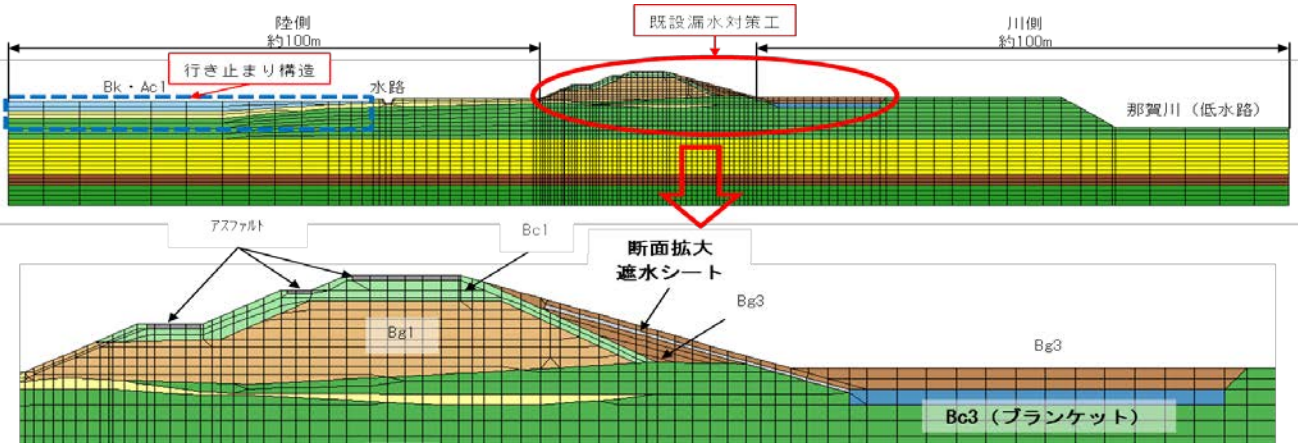


図-5 モデル化した基礎地盤断面

丸区間では簡易ボーリングの試掘結果より写真-1 で示す玉石 (礫質土) を確認している。

また、平成 30 年 7 月豪雨による洪水で発生した 4k6 付近の背後地にある製材所からの基盤漏水は、堤防からやや離れた H5 測線付近で粘土層や細粒分を多く含んだ砂層等からなる被覆土層が厚く分布し、これが行き止まりのような構造になって、被覆土層の薄い製材所のあたりで漏水が発生したものと考える。この構造は、先述した河川堤防のパイピングの発生要因の新たな着眼点②行き止まり構造によって堰あげられることによって、①被覆土層厚が相対的に薄くなる箇所にあてはまる。また、当該箇所は砂礫層の上に透水性の小さな砂質土 (中間土) が分布する③複層構造であるため、パイピングが生じやすい断面の可能性がある。

4. 浸透に対する安全性の照査

(1) 堤防のモデル化

漏水履歴が集中する V2 測線の結果をもとに堤内側の基礎地盤をモデル化した。牽引式電気探査結果及び簡易ボーリング結果を基に堤内地において、図-5 に示すように堤内側に向かって被覆土層が厚く分布する地盤構造 (破線区間) をモデル化した。本調査で把握した行き止まり構造をモデル化し、安全性の照査及び従来モデルとの比較を実施した。

条件等は従来モデルの土質定数及び本調査結果より見直した定数を用いた。照査外力は手引きに準拠し作成した。境界条件等は従来モデルで同様の条件を適用した。

表-1 従来モデルによる解析結果 (H16)

計算箇所	断面	計算ケース	局所動水勾配			すべり破壊		
			計算値	判定	基準値	計算値	判定	基準値
L4k6 大京原 左岸箇所	H16断面	計画高水位	0.536	×	<0.5	1.148	×	>1.45
	計画	①遮水シート	0.530	×		1.173	○	
		②遮水シート+ブ ランケット15m	0.501	×		1.730	○	
		③遮水シート+ ブランケット20m	0.488	○		1.823	○	

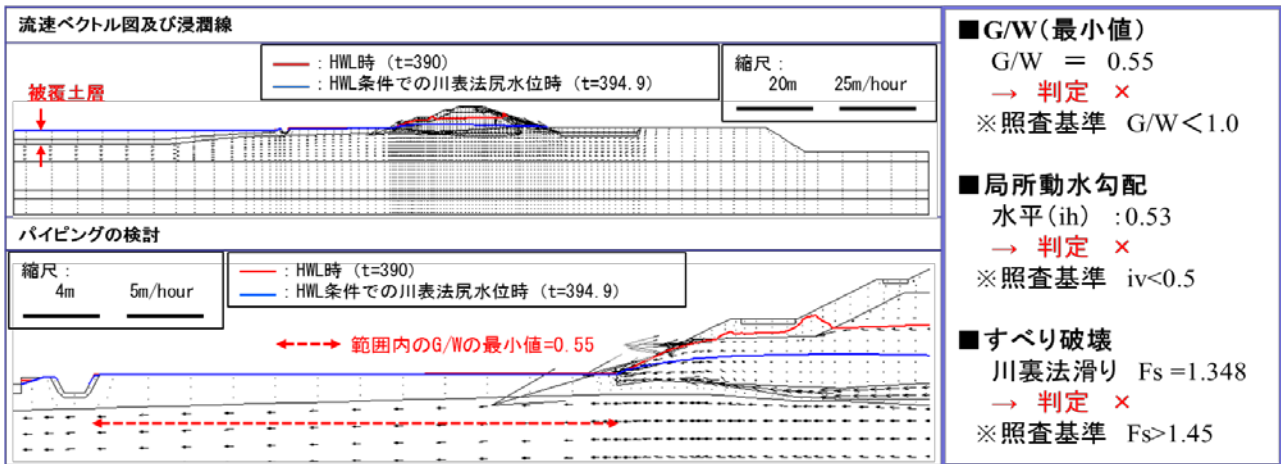


図-6 電気探査結果を反映した浸透流解析結果

(2) 従来モデルとの比較及び安全性照査結果

まず、表-1に該当箇所において、局所動水勾配及びすべり破壊を算出した当時の断面における解析結果、既設の対策工を考慮した断面における解析結果を示す。なお、従来モデルにおいては平成16年台風10号時の漏水後の照査結果を示す。表-1より、漏水対策の検討を行う平成16年当時の断面では、局所動水勾配、すべり破壊ともに基準値を満たしていなかったが、計画断面の③遮水シートとブランケット20mを実施することで、局所動水勾配、すべり破壊ともに基準値を満たした。そこで、③の対策を実施していた。

次に、今回の浸透流解析結果を図-6に示す。図-6より電気探査結果をもとに堤内地を詳細にモデル化した今回の結果からは、 $G/W=0.55$ 、局所動水勾配 $ih=0.53$ 、すべり破壊 $Fs=1.348$ となりすべての安全性照査において、基準値を満たさない結果が得られた。これは、行き止まり構造によって裏に水が抜けにくくなり、水位が上がることで堤体に水が残り、局所動水勾配や G/W 及びすべり破壊に影響を及ぼしたと考える。

また、以上のことから、従来の解析では反映できていなかった堤内地盤を詳細に調査し、反映することで、より精度の高い安全性照査を示すことができた。

5. おわりに

これまでの安全性照査では堤防法尻付近の地質を堤内地側に向かって水平に展開し堤防をモデル化することが多かったが、パイピング破壊は堤防敷幅 (B) の1.5倍程度の範囲内に行き止まり構造が分布する場合に特に発生しやすいといわれていることから、これまでのように河川区内での調査にとどまらず、今後は堤内地において電気探査等の物理探査技術や簡易な地質調査を実施し、堤内地の基礎地盤の情報もモデルに反映した上で浸透に対する安全性の照査を実施することが重要であると考え。

謝辞：本調査の実施に当たり、多くのご助言をいただ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) 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