

# 堤防基盤の弱部抽出にあたっての 効率的な調査手法について —電気探査の活用—

帯広開発建設部 治水課 ○遠藤 和章  
高橋 賢司  
猪子 長

十勝川下流の堤防は5割の丘陵堤で整備しており、基盤は旧河道が複雑に入り組んでいる。堤防詳細点検では対策不要区間であったが、2016年8月洪水時に一部の箇所では盤ぶくれが発生した。要因の分析にあたっては広範囲の調査が必要であり、従来の調査では多額の費用が必要となる。コスト削減の観点から効率的な調査手法の検討及び調査範囲の優先順位の考え方、盤ぶくれが発生した箇所の調査結果について報告するものである。

キーワード：旧河道、牽引式電気探査、基盤漏水の弱部抽出

## 1. はじめに

十勝川下流の堤防は、5割の丘陵堤で整備しており、基盤は旧河道が複雑に入り組み、泥炭地盤の箇所もある。本報告では、調査範囲の優先順位の考え方、牽引式電気探査を活用し従来のボーリング調査では確認が困難であった基盤漏水の弱部の抽出結果を報告するとともに、今後の効率的・効果的な堤防整備を目的とした牽引式電気探査の活用方法について報告する。

## 2. 十勝川下流部の基盤漏水に対する現状と課題

### (1) 十勝川下流部の河川特性

十勝川下流部の地形は、図-1に示すように旧河道が多く確認される他、1937年に完成した十勝川統内新水路は、洪水被害の軽減等を目的に千代田鉄道橋から茂岩まで新水路として掘削しており(図-2)、堤防縦断方向の基礎地盤構造は複雑と考えられる。

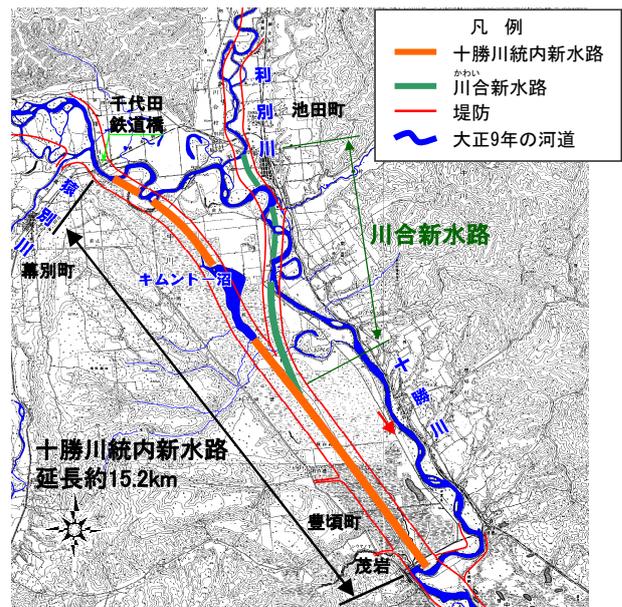


図-2 十勝川統内新水路位置図



図-1 十勝川34.0km～37.0kmの治水地形分類図

軟弱地盤地帯である十勝川37.4kmより下流域(図-4)では、図-3に示すように軟弱地盤における堤防基盤のすべり防止を期待できる5割の丘陵堤が1987年より整備され、川裏に深さ1.4m～2m程度の水路が敷設されている。



図-3 十勝川右岸36.2km堤防横断形状(縦横比2:1)

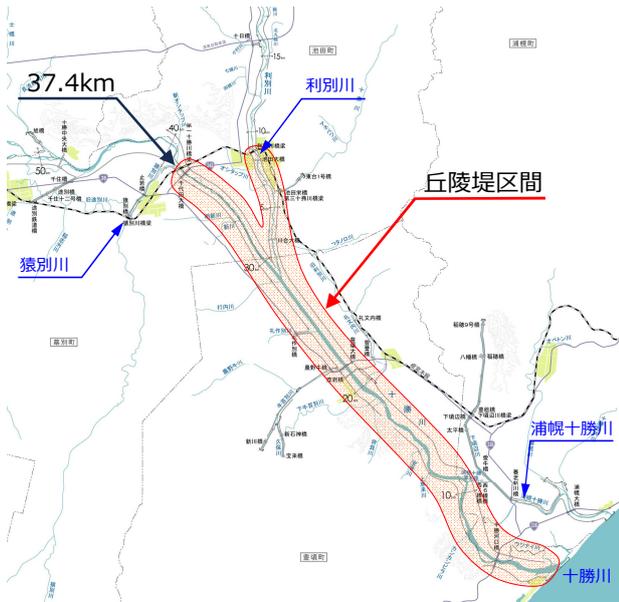


図-4 丘陵堤区間位置図

## (2) 基盤漏水の弱部抽出にあたっての課題

十勝川下流部では2000年～2008年に浸透に対する詳細点検が実施されており、十勝川本川では全ての区間で基盤漏水に対する安全性は確保され、対策不要区間となっているが、支川である利別川の一部で要対策区間となっている。一方で、2016年8月洪水では、十勝川下流の水位観測地点である茂岩で計画高水位を1m以上超える水位が確認され、十勝川右岸36.2km付近の川裏側の水路で盤ぶくれや噴砂が確認された(写真-1)。



写真-1 川裏側の水路底で確認された噴砂

これまでの浸透に対する詳細点検では、平均動水勾配や地形、被災履歴等を基に代表断面を設定し、ボーリング調査を行い、浸透流解析や安定解析により堤防の安全性の評価を行ってきた。しかし複雑な地盤構造を持つ区間においては、設定した代表断面が基盤漏水に対する弱部と一致しない場合がある。

2011年7月に決壊した福岡県を流れる矢部川の堤防は、旧河道と氾濫平野の境界に位置し、図-5に示すように

既往調査でわからなかったAs層(砂層)が堤防を横断する形で存在し、川裏側で消失する行き止まり構造であることが事後調査でわかった<sup>1)</sup>。

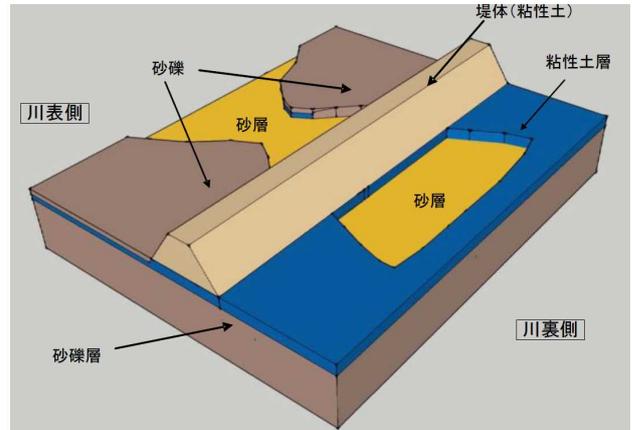


図-5 矢部川堤防決壊箇所概念図<sup>1)</sup>

ボーリング調査等の従来調査のみでこのような基盤漏水の弱部を評価することは困難である。

本報告では、十勝川下流部を対象に効率的に基盤漏水の弱部を抽出するために実施した牽引式電気探査の調査範囲の優先順位の考え方と基盤漏水の弱部を抽出した結果を示した。

## 3. 牽引式電気探査の実施優先順位の設定

旧河道が多く、軟弱地盤が堆積する十勝川下流部は河口までの延長が37.4km(両岸74.8km)と長大である。牽引式電気探査を実施するに当たっては、始めに下記評価項目に該当する区間を抽出し、その後、評価項目に点数を与え実施優先順位を設定した。

表-1に牽引式電気探査の実施優先順位を示した。実施優先順位を設定した結果、高位(評価ランクS、A)に該当する区間は21.4km、中位(評価ランクB)に該当する区間は、20.2km、低位(評価ランクC)に該当する区間は8.9kmとなった。

表-1 実施優先順位一覧表

河川名	岸別	評価ランク(km)				総延長(km)
		S	A	B	C	
十勝川(本川)	右岸	7.4	0.0	8.2	0.7	16.3
	左岸	0.0	6.6	2.5	6.8	
利別川(支川)	右岸	1.5	1.9	2.7	1.4	7.5
	左岸	2.1	1.9	4.2	0.0	
猿別川(支川)	左岸	0.0	0.0	2.6	0.0	2.6
総延長(km)		11.0	10.4	20.2	8.9	50.5

以下に評価項目及び実施優先度の設定の考え方を示した。

### (1) 実施優先順位の評価項目

#### a) 旧河道の有無

旧河道は、地盤構造が複雑で、基盤漏水の弱部になり易い地形である。旧河道の有無は治水地形分類図を基に抽出した。

#### b) 被災履歴の有無

過去に被災履歴（盤ぶくれや噴砂）がある区間は、潜在的に盤ぶくれが発生し易い基礎地盤構造である。被災履歴の有無は既往の詳細調査結果の他、2016年8月洪水時の被災記録を基に抽出した。

#### c) 被覆土層厚

被覆土層が薄い箇所は被覆土層下面に水圧が作用し易いため、盤ぶくれが発生し易い箇所である。被覆土層厚は既往の浸透に対する詳細調査結果を基に盤ぶくれの安全性照査対象である被覆土層厚3m以下の区間を抽出した。

#### d) 堤内地盤高

堤内地盤高が低い箇所は、被覆土層の下面標高が同じ場合、被覆土層厚は相対的に薄くなり盤ぶくれが生じやすい箇所になる。今回の調査ではLPデータを用いて堤防縦断方向の高さを段彩図により評価し、相対的に堤内地盤高が低い箇所を抽出した。

#### e) 支川合流部

支川合流部は、本川と支川の両方の外水位が作用するため、仮に被覆土層厚が3m以上であっても被覆土層の下面に高い水圧が作用する可能性が高いため盤ぶくれが生じやすい<sup>2)</sup>。今回の調査範囲の選定に当たっては、本川と支川（利別川・猿別川）が合流する細分区間を支川合流部として抽出した。

#### f) 詳細調査結果

既往詳細調査結果より盤ぶくれ（G/W）に対する安全性が基準値（ $G/W \geq 1.0$ ）を満たさない区間は基盤漏水に対する危険性が高いため、盤ぶくれに対する安全性評価結果を基に抽出した。なお、支川利別川の左岸6.0k～8.1kの区間では盤ぶくれ（G/W）に対する基準値を満たさない。

#### g) 人家連担区間

人家連担区間は堤防法尻付近に集落や市街地が連続している区間を測量平面図より抽出した。

#### h) 代表断面の有無

選定した調査区間に代表断面がある区間は、既往の詳細点検で相対的に浸透に対する弱部として選定されているため、抽出した。

### (2) 実施優先順位の設定

牽引式電気探査の実施優先順位は、始めに上述(1)で設定した評価項目に該当する調査区間（総延長50.5km）を抽出した。次に評価項目に点数を与えて実施優先順位を設定した。

上述(1)で設定した評価項目a)及びb)は、基盤漏水の弱部になり易い地形であること、過去に被災した実績があるため、点数を5点と高く設定した。

上述(1)で設定した評価項目c)～g)は、設定した代表断面が基盤漏水の弱部と一致しない場合もあることや人家連担区間は直接、浸透の安全性に影響しないため点数を2点と低く設定した。また、上述(1)で設定した評価項目h)は、1点に設定した。なお、上述した全ての評価項目に該当する場合の合計点数は21点である。

牽引式電気探査の実施優先順位は、評価点数の合計の頻度分布図を作成し、最も頻度の高い調査区間を評価ランクBとし、評価ランクBより点数が高く、相対的に基盤漏水の弱部となり易い調査区間を評価ランクS及びAとした。また、評価ランクBより点数が低く、相対的に基盤漏水の弱部になりにくい調査区間を評価ランクCとした。図-6は各調査区間の評価点数の合計の頻度分布図である。図-6より、最も頻度が高い調査区間の評価点数の合計は7点以上～10点未満である。実施優先順位の設定は、評価点数の合計が7点以上10点未満を中位（評価ランクB）、10点以上を高位（評価ランクS、A）、7点未満を低位（評価ランクC）に設定した。なお、高位の中でも評価点数の合計が12点以上の調査区間を評価ランクSとして最も実施優先順位の高い調査区間として設定した。

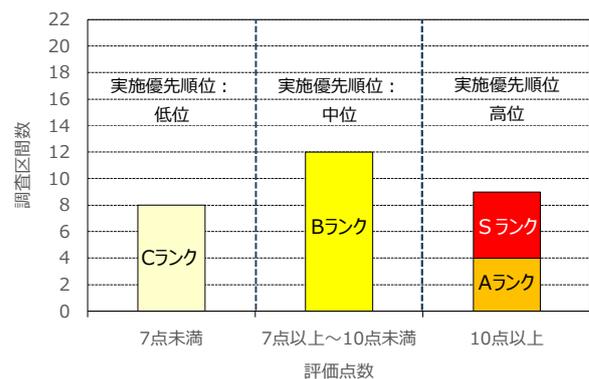


図-6 各調査区間の評価点数の頻度分布図

## 4. 牽引式電気探査の測定方法

電気探査は地盤に電気を流し、電気の流れにくさ（地盤の抵抗）より、地盤内部の比抵抗分布を推定するものである。一般的に高比抵抗値を示す部分は砂質土や礫質土と推定され、低比抵抗値を示す部分は粘性土として推定される。また、後述する簡易ボーリングや室内土質試験結果を基に比抵抗値と土質を対比することで地盤内部の地盤構造を連続的に推定することが可能となる。

牽引式電気探査はキャパシタ電極を利用することにより、電極棒を地盤に打設することなく探査ができる手法である。このため、牽引式電気探査は電極設置型の電気探査と比較して測定時間が1/2～1/3と短く作業効率が良い他、探査費用も電極設置型の電気探査と比較して1/2程度に抑えられる利点がある。また、従来の

調査（ボーリング調査）で仮に1kmの区間を深度6m/本のボーリングを25mピッチで実施した場合、3000万程度の調査費用が発生するのに対し、牽引式電気探査の費用は1km当たり450万程度であるため、調査費用を1/6以下に抑えることができ、コスト的にも有効な調査手法である。

今回は浅部の比抵抗値を測定できる平板型電極も使用して堤防縦断方向の地盤構造を評価した(写真-2)<sup>3)</sup>。牽引式電気探査は人力で電極を牽引し、地盤内の比抵抗値の測定を行う(写真-3)。牽引式電気探査の測定深度は、送受信機の間隔により変更でき、必要な深度までの比抵抗値が得られるように同一測線で複数回測定する。なお、1日当たりの測定長は1km程度である。

電気探査は前述したように地盤の比抵抗を連続的に把握可能であるが、地盤構造を評価するには、土質と比抵抗値を対比する必要がある。この土質の確認は仮設を伴わず掘進できる簡易ボーリング(写真-4)を用いることで効率的に実施できる。

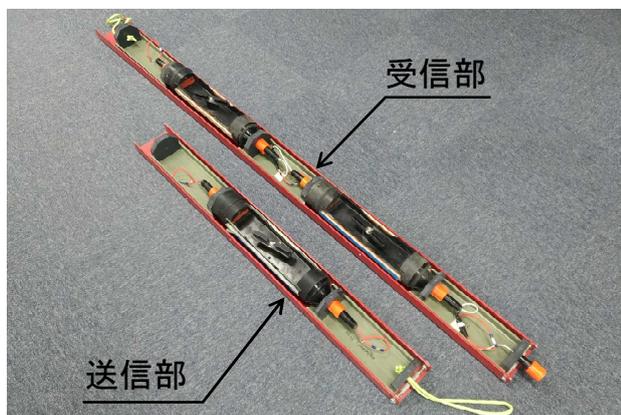


写真-2 平板型電極



写真-3 牽引式電気探査測定状況



写真-4 簡易ボーリング実施状況

## 5. 調査結果

### (1) 探査結果

図-7は2016年8月洪水で川裏側水路内で盤ぶくれや噴砂を確認した十勝川右岸35.8km+100m～36.6km+40m区間(測線長760m)の川裏側法尻における堤防縦断方向の比抵抗分布図を示したものである。なお、図中の青色の一点鎖線は水路底の位置である。また、調査区間は評価ランクSランクに該当する

図-7より、距離程880m(36.0k+20m)～1120m(36.2k+20m)の深度2m付近に比抵抗値が $200\Omega \cdot m$ 未満の低比抵抗区間が確認された。また、距離程1340m(36.4k+20m)～1560m(36.6k+40m)では深度2m以深の深度にも低比抵抗区間が確認された。

### (2) 簡易ボーリング結果

図-7に示す表層部に低比抵抗が確認された距離程1080m(36.2k+20m)で土質と比抵抗値の対比を行うため、簡易ボーリング(TK-R36.20k)を実施した。なお、簡易ボーリングを行った位置は、盤ぶくれや噴砂を確認した十勝川右岸36.20kの川裏法尻付近で実施した。写真-5はTK-R36.20kのコア写真である。コア観察を行った結果、深度0.0m～1.0mは礫混じり砂質シルト、深度1.0m～2.65mはシルト、深度2.65m～3.55mはシルト混じり細砂であった。また、深度3.55m以深は礫に当たり、コア採取ができなかった。

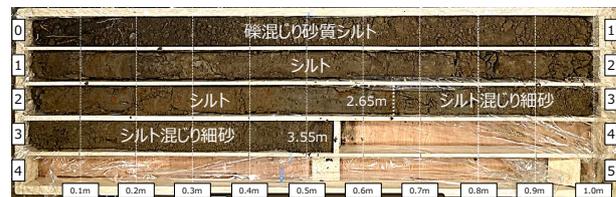


写真-5 TK-R36.20kのコア写真

### (3) 粒度試験結果

図-8は、TK-R36.20kで採取した土の粒径加積曲線を示した。図-8より、深度1.0m～2.65mは粘性土を主体とし、深度2.65m～3.55mは砂質土を主体とすることがわかった。

### (4) 地盤構造

図-9は、簡易ボーリングを実施した箇所の比抵抗分布図を拡大したものである。深度0.00m～1.0mは礫混じり砂質シルトであり、中比抵抗区間に当たる。深度1.00m～2.65mはシルトを主体とする土質で低比抵抗区間に当たる。また、深度2.65m～3.55mまでは砂質土を主体とする土質で中比抵抗区間に当たる。深度3.55m以深は、簡易ボーリング実施時に礫当たりにより貫入不能になった。なお、貫入不能となった深度は高比抵抗区間で礫質土を主体とする土質であると考えられる。

図-10は、既往の浸透点検時に実施したボーリング地点付近の比抵抗分布図を拡大したものである。深度0.0m～0.6mの間は礫質土であり、高比抵抗区間に当たる。

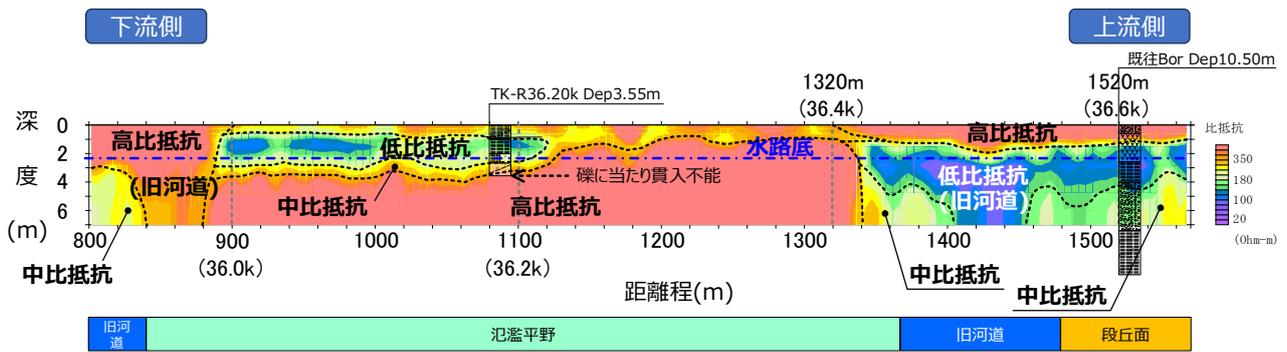


図-7 十勝川右岸 35.8km+100m～36.6km40m 区間の比抵抗分布図 (縦横比 10:1)

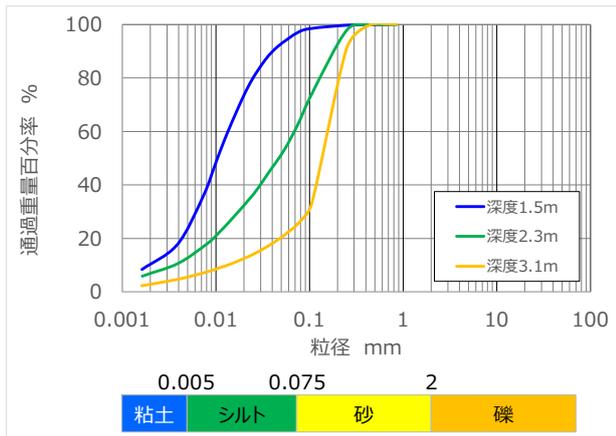


図-8 採取した土の粒径加積曲線

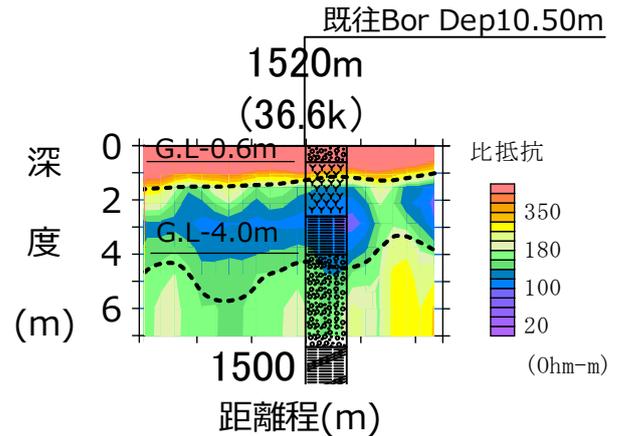


図-10 既往ボーリング地点の地盤の比抵抗値

以上の結果より、調査区間の地盤構造を以下に示す。

図-7 に示すように調査区間は距離標 1340m(36.4k+20m)を境に上下流で地盤構造が異なる。距離標 1340m(36.4k+20m)より下流側は高比抵抗であり、礫質土を主体とする地盤上に連続性のある低比抵抗の粘性土が距離程 880m(36.0k+20m)～1120m(36.2k+20m)まで分布していると考えられる。距離標 1370m(36.4k+50m)～1480m(36.6k+40m)は治水地形分類図によると旧河道とされているが、今回の調査結果によると 1340m(36.4k+20m)～1540m(36.6k+20m)付近まで旧河道と考えられる。また、既往の浸透点検では堤防法尻に粘性土が厚く堆積している結果が得られているが、今回の調査結果より粘性土が厚く堆積する区間(低比抵抗区間)は距離標 1340m(36.4k+20m)～1560m(36.6k+40m)までと考えられる。

## 6. 考察

今回の調査で確認された表層付近に連続して堆積する粘性土は、図-11より層厚は1.65mであり、水路深さは2.3mであるため、水路底の粘性土層厚は0.35mと薄くなると考えられる。

このことから、十勝川右岸36.2km付近では2016年8月洪水時に川表側から河川水が透水性の高い砂質土や礫質土を介し、川裏側に浸透し、粘性土下面に水圧が作用したことにより発生したものと考えられる。

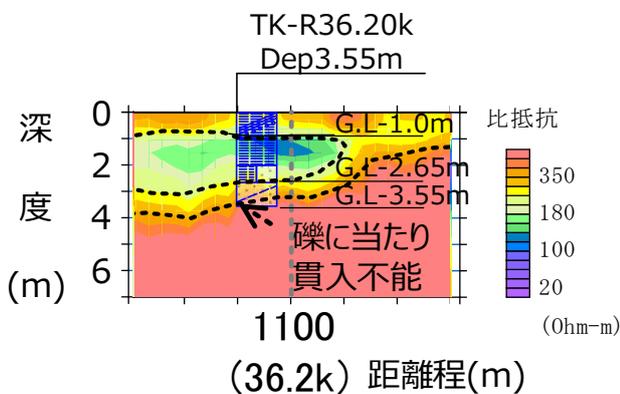


図-9 TK-R36.20k付近の地盤の比抵抗値

深度0.60m～4.0mは泥炭及びシルトを主体とする土質であり、深度1.5m～4.0mまでは低比抵抗区間に当たる。なお、深度0.6m～1.5mは泥炭であるが高比抵抗を示す理由は、既往ボーリング箇所と探査測線が一致しておらず、地盤分布状況が異なるためと考える。また、深度4.0m以深は礫質土であり、中比抵抗区間に当たる。なお、深度4.0m以深の礫質土の比抵抗値が簡易ボーリングTK-R36.20kの礫質土と比較して比抵抗値が低いのは礫質土のマトリックスが砂質シルトやシルトであるためと考える。



図-11 川裏側水路付近の地盤構造

## 7. まとめ

### (1) 実施優先順位の設定

既往資料を基に旧河道の有無や被災履歴の有無、被覆土層厚等の8つの評価項目を基に牽引式電気探査の実施優先順位を設定した結果、高位（評価ランクS、A）に該当する区間は21.4km、中位（評価ランクB）に該当する区間は、20.2km、低位（評価ランクC）に該当する区間は8.9kmとなった。

### (2) 被災箇所の地盤構造

2016年8月洪水で盤ぶくれや噴砂を確認した区間では、これまでのボーリング調査で確認できなかった粘性土層の連続性が確認され、水路底では粘性土層が薄くなり、基盤漏水の弱部になり易い地盤構造であることがわかった。

### (3) 牽引式電気探査の活用

今回の調査では、牽引式電気探査を活用し、調査区間の地盤構造の評価を行った。その結果、川裏側法尻部の堤防縦断方向では、地盤構造が複雑であり、基盤漏水の弱部となり得る粘性土層の有無や連続性の他、旧河道の土質等、ボーリング調査では把握することが困難である連続的な地盤構造を把握することができ牽引式電気探査の有効性を確認できた。

## 8. おわりに

今後、十勝川の堤防整備を効率的・効果的に実施するため、牽引式電気探査の活用方法を以下に示す。

### (1) 詳細調査箇所の選定

詳細調査地点の間隔は、浸透に対し問題があると想定される区間では最低1km毎に実施することが目安とされているが<sup>4)</sup>、地盤構造が複雑な場合、基盤漏水の弱部を見落とす恐れがある。したがって、事前に牽引式電気探査を行い、この結果を踏まえ、基盤漏水の弱部となり得る粘性土層の薄い箇所や堤防縦断方向で地層構造が異なる箇所に詳細調査箇所を選定することで効率的・効果的な詳細調査を実施することが可能となる。

### (2) 対策工の適用区間の設定

対策工の適用区間は、これまで代表断面での調査・検討結果を基に設定してきた。しかし、細分区間内で地盤構造が異なる場合、代表断面で検討された対策工の適用区間が適切でない場合もある。したがって、堤防縦断方向で牽引式電気探査を行い、堤防縦断方向の地盤構造を把握することで代表断面で検討された対策工の適用区間を設定することができる。

### 参考文献

- 1) 九州地方整備局：矢部川堤防調査委員会 報告書 2013.3
- 2) 土木学会：令和元年度台風19号による阿武隈川の漏水箇所における詳細調査及び被災要因分析 2021.6
- 3) 土木学会：物理探査技術を活用した基盤漏水に関する河川堤防の健全度評価 2021.12
- 4) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引（改訂版）2012.2