

河川堤防における統合物理探査手法を用いた 安全性評価について

豊原 裕子

関東地方整備局 下館河川事務所 計画課 (〒308-0841 茨城県筑西市二木成1753番地)

東日本大震災で被災した、あるいは被災した恐れのある下館河川事務所管内の小貝川堤防では、震災後に堤体への影響を評価するための緊急調査として統合物理探査を実施した。その結果、堤体内に緩みの恐れのある箇所が確認されたため、地質調査及び浸透流解析を行うことにより安全性を再評価し、対策工実施の必要性を確認した。

本報告は、統合物理探査による堤防弱部の抽出から安全性再評価までの検討経緯をまとめたものであり、統合物理探査の有用性についても検討したものである。

キーワード 統合物理探査, 地質調査, 浸透流解析, 安全性評価

1. はじめに

下館河川事務所管内の小貝川堤防は、2011年3月11日に発生した東日本大震災により、沈下、法崩れ、亀裂等の被災を受けた。被災箇所の復旧工事は急ピッチで進められたが、見た目上被害が無い堤防においても視認出来ない亀裂等がある可能性は否定できないことから、堤防の緩みや堤体内部の変状を把握することを目的に緊急調査として統合物理探査を実施した。

実施区間は図-1に示す延長約32kmであり、本区間の選

定にあたっては、特に旧河道が蛇行している箇所や旧堤と重なる箇所等を抽出した。

2. 統合物理探査による堤防弱部の抽出

本調査で採用した物理探査手法は、表面波探査（ランドストリーマ方式表面波探査）及び電気探査（牽引式電気探査）である。このように、複数の物理探査を実施して異なる物性値断面を求め、既存資料も加味して総合的



図-1 小貝川における統合物理探査実施箇所

表-1 採用した物理探査手法の特徴

物理探査方法	得られる物性値	特徴
表面波探査 (ランドストリーマ方式表面波探査)	S波速度分布	<ul style="list-style-type: none"> ・地盤の硬軟と相関あり ・深度20m程度までの地盤のS波速度を二次元断面として画像化出来る ・S波速度値から換算N値を求め、N値による従来の基準に沿った土質地盤評価を可能とする
電気探査 (牽引式電気探査)	比抵抗分布	<ul style="list-style-type: none"> ・不飽和部における材料の粒度特性及び間隙率と相関あり ・堤体の浸透特性を推定することが可能



写真-1 物理探査の実施状況 (左) ランドストリーマ方式表面波探査 (右) 牽引式電気探査表

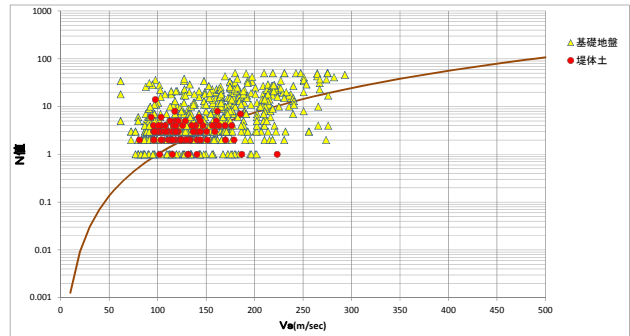


図-2 小貝川におけるS波速度VsとN値の関係

に解析を行う手法が統合物理探査である。

今回採用した物理探査の特徴について、表-1に示す。まず、表面波探査で伝わる表面波（レイリー波）を測定・解析することによりS波速度構造を求め、地盤の締めまり具合を調査した。次に、電気探査で電流の流れにくさ（比抵抗）の分布状況を求めることにより、地盤の土質構造を調査した（写真-1）。

(1) 堤防弱部の抽出にあたっての課題

物理探査の現地調査結果を基に、堤防弱部の抽出を行うこととしたが、抽出にあたって下記課題が発生した。

a) 観測値の妥当性の確認

測定にあたっては、データの品質を現場で逐一チェックするなど、精度管理には十分留意して行ったが、交通振動や構造物等、探査に影響を与える支障物も存在するため、測定したデータが本当に妥当な値であるのか、精査を行わなければならない。

b) 閾値設定にあたっての課題

堤防弱部の抽出については、閾値となる管理基準値を設定しなければならない。設定にあたっては、当該河川の特徴を十分把握し、既存データの物性値や土質の特徴等を留意し、目的にあった閾値を設定することが重要とされている。そのためには、今回の調査により観測されたS波速度と比抵抗値が、従来、小貝川で安全性評価に用いてきた物性値とどのような関連性があるかを明らかにし、相関を見出す必要がある。

(2) 課題に対する対応と妥当性の確認

上記の課題についての対応を以下に示す。

a) 観測値の評価

観測値の妥当性については、小貝川では過去に比較的多くのボーリングを実施しており、その地質調査結果が残されていることから、これら既存データと既往文献¹⁾

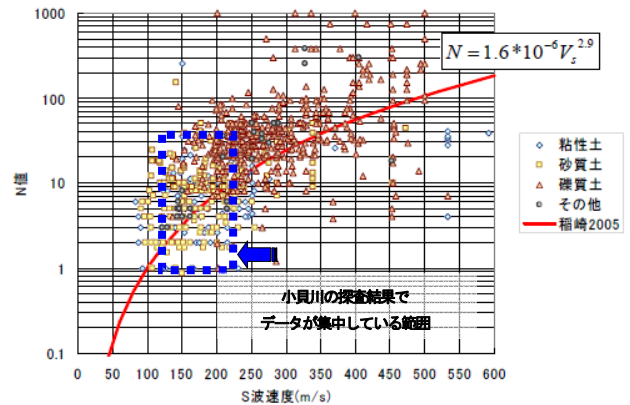


図-3 既往文献との比較評価

を用いて評価を行うこととした。具体的には、S波速度とN値の関係、比抵抗値とD20の関係、比抵抗値と細粒分含有率Fcの関係、比抵抗値と透水係数の関係について分析し、更に得られた結果を既往文献と比較することで評価を行っている。

一例として、図-2, 3にS波速度とN値の関係を評価した結果を示す。小貝川の物理探査結果では、S波速度が大きくなるとN値も大きくなる傾向が見られた。これを既往文献の結果と比較したところ、概ね関係式の上今回の観測データがプロットされ、大きな乖離は見られなかったことから、観測結果は妥当な結果であったと判断した。

b) 閾値設定における考え方と既存データの整理

閾値の設定は、管理基準値を決定するために行う作業であるが、基本的な考え方は、堤体土及び基礎地盤が共に砂質であり、双方に緩みが発生している箇所（即ちS波速度の遅い箇所）が最も危険性の高い箇所であるとし、その部分を抽出出来るように設定することとした。

比抵抗値の閾値は、砂質土と粘性土の土質区分を行う

ことを目的に設定した。設定に当たっては、既存データから把握できているN値や塑性指数Ipを考慮し、更に高比抵抗異常部は粗粒材料で構成されている箇所と対応しており、過去の漏水被害発生箇所とも整合的であるとの研究報告²⁾も参考にし、小貝川における漏水履歴を重ね合わせることで設定した。

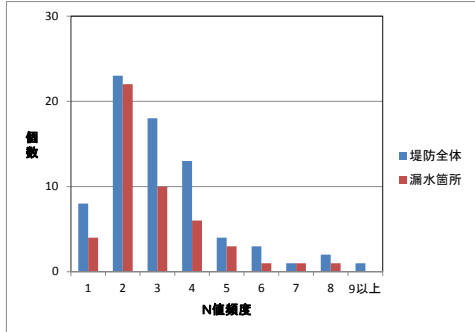


図4 小貝川堤体土におけるN値の頻度分布

S波速度の閾値は、堤体土や基礎地盤の締まり具合を評価することを目的に設定した。小貝川の調査区間の堤体土は、図-4に示すようにN値2付近にピークが確認されたため、N値2に相当するS波速度 ($V_s=125\text{m/s}$) を設定した。更に、過去の漏水被害発生箇所を反映させた結果、これについても同傾向であることが分かった。また、河川堤防に緩みが発生した場合、この設定したN値2より値が低くなることも考えられるため、最も緩い箇所を抽出することを目的にN値1に相当するS波速度 ($V_s=100\text{m/s}$) についても閾値として設定した。

(3) クロスプロット解析と安全性評価

設定した閾値の結果を、管理基準値一覧表として表-2に整理した。また、S波速度と比抵抗の関係をクロスプロット解析図に落とし込み、設定した閾値でゾーニングした(図-5)。ゾーニングでは、図-5のイメージ図に示すとおり調査結果を【a, b, c, d1, d2】の5種類に区分している。

堤体浸透性の安全性評価に際しては、この結果を基にして調査区間の距離標単位で評価をそれぞれ実施した(表-3)。評価の考え方については以下のとおりである。

浸透に対して比較的安全と考える a, b, c については、

表-2 管理基準値一覧表性評価

安全性 評価区分	堤体部		基礎地盤部	
	比抵抗	S波速度	比抵抗	S波速度
a	$r < 100$	$V_s > 125$	$r < 60$	$V_s > 125$
b	$r < 100$	$V_s \leq 125$	$r < 60$	$V_s \leq 125$
c	$r \geq 100$	$V_s > 125$	$r \geq 60$	$V_s > 125$
d1	$r \geq 100$	$100 < V_s \leq 125$	$r \geq 60$	$100 < V_s \leq 125$
d2	$r \geq 100$	$V_s \leq 100$	$r \geq 60$	$V_s \leq 100$

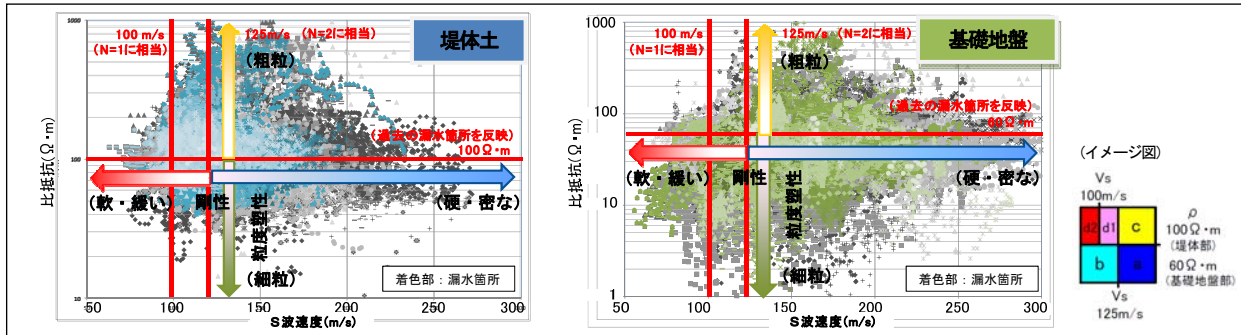


図5 クロスプロット解析図 (左) 堤体土 (右) 基礎地盤

表-3 統合物理探査結果に基づく安全性評価結果の一例 (小貝川右岸 43.6k~47.2k を抜粋)

河川名	岸別	探査区間(km)	漏水実績	緩み領域抽出結果	基礎地盤の緩み状況	地震による大・中規模変状	大・中規模耐震復旧工事の有無	既設浸透対策工の有無	東日本大震災以降の洪水による被災履歴	安全性評価結果
小貝川	右岸	43.6 ~ 43.8	無	d1	a	無	無	有	無	堤体土にやや緩みが確認されるが、浸透対策が行われており、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。
	右岸	43.8 ~ 44.2	無	d1	c	無	無	無	無	堤体土にやや緩みが確認され、浸透対策も行われていない。震災による変状は確認されず、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。
	右岸	44.2 ~ 44.4	無	d1	c	無	無	有	無	堤体土にやや緩みが確認されるが、浸透対策が行われており、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。
	右岸	44.4 ~ 44.6	無	d2	c	無	無	無	無	堤体土に緩みが確認され、浸透対策も行われていない。震災による変状は確認されず、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。
	右岸	44.6 ~ 45.0	無	d1	c	無	無	無	無	堤体土にやや緩みが確認され、浸透対策も行われていない。震災による変状は確認されず、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。
	右岸	45.0 ~ 45.4	無	b	c	無	無	無	無	堤体に緩み領域が確認されず、震災後の洪水履歴も無いため、震災前と同等な安全性を確保している。
	右岸	45.4 ~ 45.8	無	c	c	無	無	無	無	堤体に緩み領域が確認されず、震災後の洪水履歴も無いため、震災前と同等な安全性を確保している。
	右岸	45.8 ~ 46.0	無	b	c	無	無	有	無	堤体に緩み領域が確認されず、震災後の洪水履歴も無いため、震災前と同等な安全性を確保している。
	右岸	46.0 ~ 46.2	無	d2	b	無	無	有	無	堤体土に緩みが確認されたが、浸透対策も施されており、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。
	右岸	46.2 ~ 46.8	無	d2	a	無	無	有	無	堤体土に緩みが確認されたが、浸透対策も施されており、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。
	右岸	46.8 ~ 47.2	無	d2	c	無	無	有	無	堤体土に緩みが確認されたが、浸透対策も施されており、震災後の洪水履歴もないため、震災前と同等な安全性は確保されている。

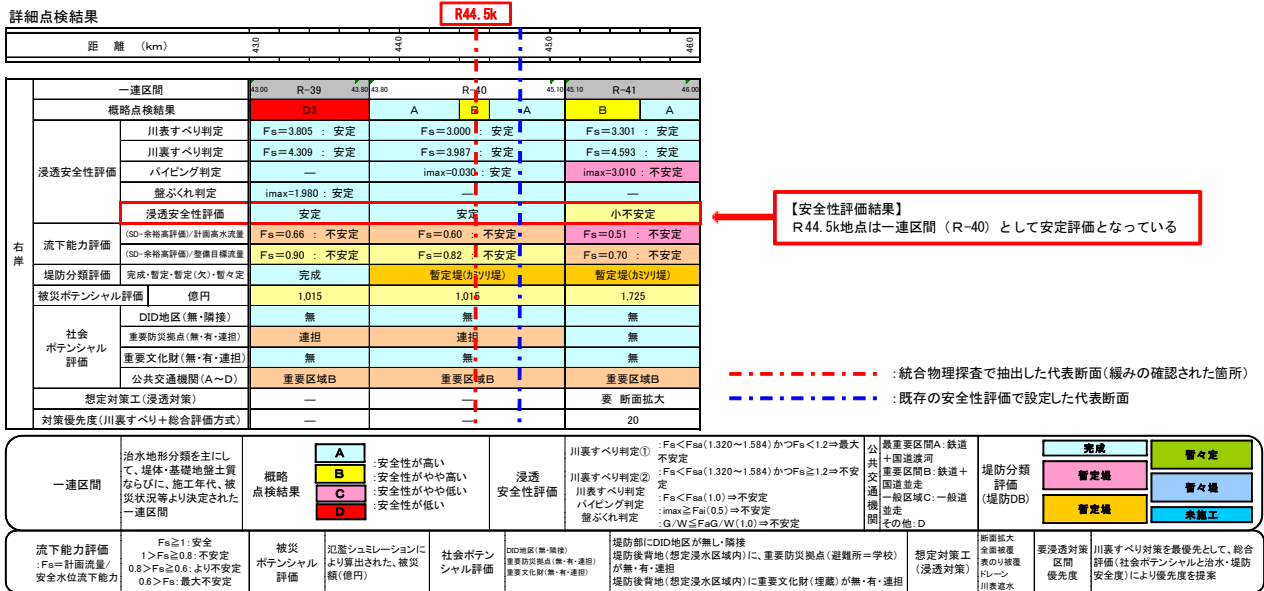


図-6 詳細点検結果一覧（既存資料より L36.0k, R44.5k, R47.0k を含む区間を抜粋）

単位距離標区間(200m)における堤体内で最も多く含まれる区分を代表とした。浸透に対して危険な領域となるd1, d2については、単位距離標区間においてd1, d2の占める面積が優位でない場合でも、堤体方向に連続的に現れている場合や、断続的であっても広い範囲に分布する傾向がある場合は、安全側の評価となるように積極的に採用した。

評価の結果、一部の区間でd1, d2評価が認められた。更に、評価結果に対する妥当性の確認として、評価区分毎に過去の漏水箇所を反映させた結果、漏水被害が発生していた箇所の半数以上が今回d1, d2評価に区分された箇所であったことが判明し、評価は妥当であったと考えられた。

これらの結果を整理すると、統合物理探査の結果、幾つかの探査区間で堤体内部に緩みが確認された。しかし、これらの大部分は、堤体直下の基礎地盤に緩みが確認されておらず、緩みは震災前から発生していた可能性が高いことが推測された。また、震災後の洪水に対して漏水等の被害がなかったことから、本調査区間は震災前と同等の安全性を確保しているものと評価した。

3. 地質調査による検証

安全性評価の結果、小貝川の堤防は、河川管理上は震災前と同等の安全性を有し、従来通りの堤防管理で対応可能と判断した。ただし、安全性が低いと推定される範囲では、詳細調査として追加の地質調査を行い、得られた結果から浸透流解析を行うことで安全性の再評価を行うこととした。

今回の評価結果を整理すると、小貝川では緩みの恐れ

のある区間が7箇所抽出された。これらの多くは、過去の浸透に対する安全性評価において安定と評価されていた区間であり、更に、評価を実施していた代表断面も今回の統合物理探査で確認された緩みの箇所とは異なっていた。

そのため、追加の地質調査を行うにあたっては、抽出された7区間の中でも緩みの程度が比較的大きく、優先度が高いと判断される3区間を抽出し、より安全側で再評価を行えるように代表断面の変更についても検討した。その結果、左岸36.0k, 右岸44.5k, 右岸47.0kの3地点においてボーリング及び土質試験を行い、その結果から浸透流解析を行うこととした。

本報告では、再評価の結果、浸透に対する安全性評価が変わる結果となった右岸 44.5k の結果について報告する。

(1) 右岸44.5k地点における地質調査結果と安全性再評価

本地点は、図-6に示すとおり過去の安全性評価では安定と評価されていた地点であった。しかし、当時の評価では、一連区間としての代表断面は44.8kに設定されており、今回緩みが確認された44.5kとは異なっていた。統合物理探査の結果では、本区間は堤体土のS波速度が相対的に低く、比抵抗値もやや高いため、緩みが発生した中間土である可能性があった。砂質系の部分は局所的と考えられるものの、浸透対策が未施工である部分も存在するため、優先度高として地質調査を実施した。

その結果、堤体土はシルト質細砂や砂混じりシルトを主体としており、川裏側は砂質土で盛土されていることが分かった。また、堤体土直下には粘性土を主体とする盛土が横断方向に連続的に分布していたため、パイピング破壊に対する安全性評価はG/Wで評価することとした

3)。

表-4 安全性評価結果（すべり破壊に対する安全性）

調査地点	すべり破壊に対する安全性						パイピング破壊に対する安全性		
	裏のり安全率 (計画高水位到達時)	必要 安全率	評価	表のり安全率 (水位低下時)	必要 安全率	評価	G/W (被覆土あり)	必要 安全率	評価
R44.5k	0.985	1.440	×	3.754	1.000	○	負圧 (法尻付近では揚圧力が発生しない)	(>1.0;○)	○

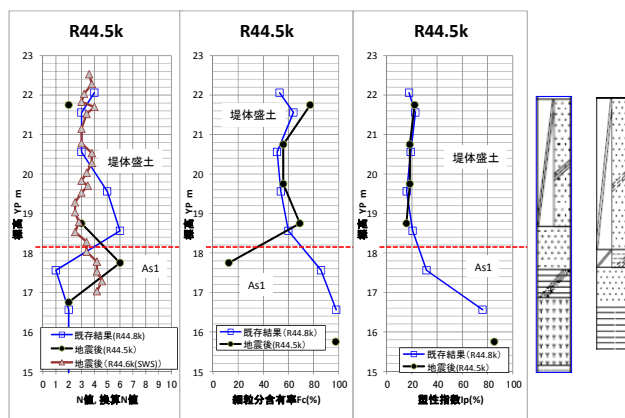


図-7 震災前後の各物性値の比較 (R44.5k)

この現地調査結果を受けて浸透流解析を行ったところ、すべり破壊に対する安全性で、裏のり面の安全率が必要安全率を下回り不安定となることが分かった（表-4）。従って、本地点では所定の安全率を確保出来るように今後対策を講じる必要があるという結論に至った。

今回の結果を受けて、当該区間については、過去の安全性評価で設定した一連区間を見直し、本結果を反映させていく必要がある。

また、再評価の結果、安全性評価が変わらなかった他の2区間についても、今回得られた新たな評価値を詳細点検結果に追加し、データを蓄積していくことが重要と考える。

(2) 震災前後における物性値の比較

前述した再評価により、懸案箇所での安全性は確認出来た。しかし、統合物理探査で新たに確認された緩みが地震によるものかどうかは判断出来なかったため、それを検証するために、震災前後の地質調査結果を比較することで影響の評価を行った。評価にあたっては、N値、細粒分含有率Fc、及び塑性指数Ipの深度分布を比較し、これら物性値の変化を確認することとした。

右岸44.5k地点では、過去に同箇所で行った地質調査結果がなかったため、近傍の右岸44.8k地点の既存結果を用いて評価を行うこととした。また、地震後の近傍地質データとして右岸44.6k地点におけるスウェーデン式サウンディング試験からの換算N値も評価に補完することとした。

その結果、一部で土質が異なる、即ち細粒分含有率Fcが異なる深度にて地震前後のデータに乖離があるものの、N値は概ね合致していることが分かった（図-7）。他2地点においても同様の結果となったため、以上のこ

とより、震災による堤体への影響は、ほとんどないものと推察された。

その他、物性値の比較を行う中で明らかになったこととして、堤体の細粒分含有率Fcについては、いずれの箇所でもFc>50%となり、ほとんどが細粒土であることが分かった。これは、堤体の安全性評価でd2としていた箇所でも細粒分が多く、浸透に対して問題とならない可能性が高いと言えるものであり、これは、比抵抗の閾値を安全側に低く設定したことに起因するものと考えられた。

小貝川の堤防は、全体的に細粒分を多く含む中間土により構成されているという特徴があり、今回の統合物理探査では、過去の漏水履歴等も考慮して堤体土の弱部を抽出しているため、カバー率も広く設定されている。そのため、細粒分を多く含む砂質土についても危険側に評価されたものとする。今後は、地質調査結果との関係を分析し、浸透上問題となる細粒分が少ない砂質土を主体とした堤体土を抽出出来るよう閾値の見直し等を検討する。

4. 統合物理探査の有用性

従来、堤防の浸透に対する安全性評価については、過去の被災履歴や地形・地質調査結果から一連区間を細分し、代表断面を選定して安全性を照査するという手法が採用されてきた。しかし、この手法は、あくまで代表箇所の評価結果を条件が同様と想定される細分区間に準用しているものであり、これらの基となる既存結果の調査密度や精度にも影響を受け、本来ある堤体内部の不均質構造や地盤構造までを把握し、それらを反映させるまでには至っていない。

今回採用した統合物理探査は、非破壊で連続的に物理量の空間的分布を得られることに特徴がある。従来のボーリングによる地質調査では、確実に得たい箇所の地質データは直接確認出来るが、周辺地盤の状況は既存データ等からの想定であった。今回のように、長区間の延長を短期間で調査して結果を出さなければならない場合、現地作業に係る時間やコスト、堤体内部の可視化による解析の効率性を考えるといずれも統合物理探査が優位となり、加えて物理探査は非破壊のため、実施面でも出水期等の時期に左右されないことからすぐに現地で対応出来るというメリットがある。

また、物理探査で推定される堤体の締まり具合（N値）は、今回の地質調査結果から評価しても、概ね精度的に問題ないと言えるものであった。このことは、今後の堤防管理を行う中で、統合物理探査が従来の安全性評価や地質調査を補完する有用な手段となり得ることを示唆しており、検証としての開削調査やボーリング調査は必要となるが、調査区間延長が長大となるような堤防区間からのスクリーニングを目的としたような調査に対しては非常に有用であると考えられた。

5. まとめ

今回、震災後の緊急調査として、延長約32kmにも及ぶ堤防を統合物理探査という新たな手法を用いて短期間かつ低コストで評価した。また、統合物理探査結果を、従来の地質調査結果に組み合わせることで、不足していた地質情報を補完し、総合的な堤防地質データとして蓄積出来たことは、今後の堤防管理、洪水対策等にとっても有意義であったと考える。

但し、このような地震による緊急調査としての大規模な統合物理探査は全国的にも例が無く、手法についても

依然確立されたものはないため、本技術が一手法として浸透するためには、今後更に精度を高めるための技術的検討やデータの蓄積が必要である。また、既往の地質調査結果との相関についても一部バラツキが確認されているため、その原因についても究明していく必要がある。

その他、今回の結果を有効に活用していくためには、事務所として過去の地質調査結果と今回の結果をリンクさせたようなデータ管理が必要と考え、他調査や工事においても日常的に使用出来るような環境を整えることが効果的であると考ええる。

本調査を通して、今後も堤防の管理に有用な情報は適切に管理、蓄積し、危険性のある箇所が確認された場合には、速やかに安全性の確認が出来るように、常日頃より堤防の安全確保に努めていきたいと考える。

参考文献

- 1) 独立行政法人 土木研究所、一般社団法人 物理探査学会：河川堤防の安全性評価のための統合物理探査適用の手引き（案），2012年3月。
- 2) 稲崎 富士：統合物理探査による河川堤防の内部構造探査技術に関する研究，2006年-2008年。
- 3) 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年2月。