

統合物理探査による河川堤防の健全性評価等検討

1. 検討目的

東北地方太平洋沖地震により、茨城県及び千葉県を中心に関東地方整備局管内の堤防等河川管理施設 では、4水系10河川に被害が及んだ。特に利根川下流部、霞ヶ浦、那珂川、久慈川、小貝川等の河川 では、沈下や、すべり、クラック等の甚大な被害が発生し、それらの総延長は740kmにも及ぶ。こ のため、平成23年4月に設立された「関東地方河川堤防復旧技術等検討委員会」より、堤防等河川管 理施設の被害状況の検証等の技術的助言を頂きながら復旧工事が進められ、平成24年6月までに概ね 工事が完了した。

しかし、大規模な被災を受け復旧工事を行った箇所以外の見た目上は健全に見える堤防でも内部の状況が不明確であり、堤防内部のゆるみ等を把握する必要があると委員会から提案され、統合物理探査手法による調査を行うことになった。

本検討では、地震により影響を受けた堤防の安全性・信頼性の確保を目的として実施された統合物理 探査の調査及び評価結果の審査を目的とした「統合物理探査検討会」を実施し、並びに上位委員会であ る「関東地方河川堤防復旧技術等検討フォローアップ合同委員会」への調査・評価結果の報告を行い、 調査で得られた結果及び、各種課題を踏まえ、「統合物理探査の今後の河川堤防調査に資する知見~統 合物理探査を利用した浸透に対する堤防の安全度評価手法について~」をとりまとめ、抽出箇所の統合 物理探査による堤防の安全性評価及び、「統合物理探査のマニュアル(素案)」の作成、統合物理探査 データベースの基本検討についてとりまとめた。

2. 検討経緯

- ・平成23年度 統合物理探査検討会の開催(1回開催)、講習会及び実地研修の実施
- ・平成24年度 「統合物理探査検討会」の開催(2回開催)、「統合物理探査の今後の河川堤防調 査に資する知見~統合物理探査を利用した浸透に対する堤防の安全度評価手法につい て~」のとりまとめ
- ・平成25年度 統合物理探査(現地測定、解析・評価)の実施、「統合物理探査による河川堤防評価マニュアル(素案)」作成、講習会及び実地研修の実施
- ・平成26年度 統合物理探査(現地測定、解析・評価)の実施、「統合物理探査による河川堤防評価マニュアル(素案)」の改訂、講習会及び実地研修の実施

3. 検討概要(平成26年度)

(1) 統合物理探查

現地状況、工事履歴、被災履歴等の事前調査、統合物理探査(表面波探査、牽引式電気探査) の現地測定を渡良瀬川、烏川、富士川、小貝川において実施し堤防の健全度について評価した。

(2) 河川堤防の健全性評価手法の検討

統合物理探査を用いた河川堤防の健全性評価手法について、調査手法や解析方法、評価手順

などの系統的な手順及び方法を検討し、「統合物理探査による河川堤防評価マニュアル(素

案)」を改訂した。

(3) 統合物理探査データベースの基本検討

統合物理探査による調査結果及び、解析結果について今後の河川堤防の維持管理や災害時の 原因究明、対策工法の検討等の基礎資料とすることを目的としたデータベースの基本検討を行 った。

4. 検討結果

4.1 統合物理探査とは

統合物理探査とは、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 に解析することにより、堤体と基礎地盤の内部構造と土質特性を推定し、合理的に河川堤防の安全性評 価を行う手法である。

統合物理探査の構成技術としては、ランドストリーマー表面波探査、牽引式電気探査、スリングラム 電磁探査の3手法が一般的であるが、本検討においては主にランドストリーマー表面波探査と牽引式電 気探査の2手法を対象としている。

ランドストリーマー表面波探査法

牽引式電気探査法

スリングラム電磁探査法 ダイボール 光電変換器 ケーブル / 信号ケーブル 產引車面 ダイボール 15 Lun ART/A 30340 -/送信器 \ 受信器 次經場 二次祖場 15m 20-80m ■送信コイルで交流磁場を発生 波長によって伝播する深さが異なり、速 ■送信部のダイポールケーブルに正負の交番電荷を させると地中に誘導電流が流 れる.これにより新たに発生し た2次磁場の大きさが地盤の と信部のダイホールゲーフルに正員の交番単何を 与えると、地盤との間にコンナサーが形成され地 盤に電流が流れる。これにより受信部側付近の地盤 にも電流が流れるので、受信部のダイポールケーブ 度も異なるという表面波の分散特性に基 づいて地下のS波速度構造を推定する手 法. 土研で開発した「ランドストリー ー」を 導電率の関数となることを利 用いることで、作業効率・解析精度が向上 ル区間に電位差が発生する。この電位差から地下 の比抵抗分布を求める。 用して地下の比抵抗分布を推 し、世界的にも広く利用されるようになった。 定する。

図-1 各探査手法の概要

4.2 統合物理探査の実施

1) 統合物理探査の対象範囲と区間延長

被災履歴、点検結果、治水上の重要性等を勘案し、本局河川管理課に協議の上、統合物理探査結果 と場防開削調査の結果の比較を行うことを目的に下記に示す、渡良瀬川、烏川、富士川の3地点と堤防 の基盤漏水が発見された小貝川の1地点の合計4地点において、統合物理探査を実施した。

表-1 各河川探査対象範囲と探査延長

調査名	河川名	左右岸	キロ杭	調査延 長	調査箇所		
					天端	川裏小 段	備考
牽引式表面波探査 牽引式電気探査	渡良瀬川	左岸	1.5 ~ 2.2k	700m	0	0	御所沼排水樋管工事に伴う堤防開 削
	鳥 川	右岸	16.9~17.3k	400m	0		石原第二樋管工事に伴う堤防開削
	富士川	左岸	2.8~3.0k	200m	0		上堀川排水樋管工事に伴う堤防開 削
	小貝川	左岸	54.4~54.9k	500m	0		堤防漏水箇所

4.3 統合物理探査の流れ

河川堤防の統合物理探査による堤防の安全性評価 は、その実施内容や方法が「河川堤防の統合物理探 査」(副題:「安全性評価への適用の手引き」)(以 下「手引き」という。)に示されおり、この手引き を参考にした。(旧独立行政法人土木研究所と一般 社団法人物理探査学会により編著)

この手引きによる探査の全体的な流れは、①事前 調査、②探査計画の立案、③探査の実施、④解析と 評価の手順である。これらの一連の流れに沿って、 得られたあらゆる情報を専門技術的かつ統合的に解 釈することによって、河川堤防の安全性の評価(解 析評価)を行うことが骨子である。ここで、堤防の 安全性の評価については、手引き中で図-2のとおり フローに基づき解説されており、本業務もこれに基 づいて実施している。具体的な安全性評価手法は、



①探査結果の整理、②物性相関の確認、③堤体及び基礎地盤のクロスプロット図の作成、④安全性評価 区分の設定、⑤安全性評価断面図の作成及び評価を実施するものである。平成26年度業務は、この流れ に従い、手引き著者の土木研究所の地質・地盤研究グループに指導を頂きながら実施し、既存の土質柱 状図や土質縦断図等の既存資料から調査地点の堤防の状態を推測した。その後、臨場において、調査地 点の踏査(下見)を行い、現地状況での障害物の有無を確認して、障害物の設置状況を勘案し、各地点 の物理探査の側線位置を決定した。この側線に従い、表面波探査及び電気探査を行って、その結果をプ ログラムで解析処理し、S波速度と比抵抗構造図を求めた。この断面図からクロスプロット図面を作成 して、堤体及び基礎地盤の土質区分と強度を推定し、既存資料と比較して総合的に評価を行った。

4. 4 統合物理探査の調査結果

表面探査と電気探査の解析結果である結果図として、各地点の測線にそった2次元S波速度構造と2 次元比抵抗構造、堤体部と基礎地盤の平均S波速度図を示す。







図-7 小貝川 小貝川左岸 54.4~54.9k 付近の天 端測線の解析結果



図-6 富士川 左岸 2.8~3.0k 付近天端測線の 解析結果

渡良瀬川は、堤防の高さが 10m を越える堤防であるため、天端の他、川裏小段に補助測線を設けて、 実施した。天端測線での平均 S 波速度は、Vs=120~200m/s 程度を示し、小段測線の堤体部 Vs=110~ 300m/s 程度であった。比抵抗は、天端測線で ρ =25~200 Q · m程度、小段測線で ρ =10~400 Q · m程 度の範囲だった。続いて、烏川における S 波速度は Vs=130~390m/s の範囲で分布し、堤体部で遅く Vs =130~190m/s 程度を中心に、基礎地盤で速く Vs=180~360m/s で分布した。比抵抗は、 ρ =50~400 Q · m程度で分布し、深部で高い比抵抗値を示した。富士川の S 波速度は、Vs=200~420m/s 程度で分布 し、堤体部で遅く Vs=200~250m/s 程度を中心に、基礎地盤で速く Vs=350~420m/s 程度を中心に分布 した。比抵抗は、 ρ =700~1300 Q · m程度で分布し、地表面付近では、場所によっては 1100 Q · m以上 の高値を示すところもあった。小貝川の S 波速度は Vs=150~420m/s の範囲で分布し、堤体部は Vs=150 ~300m/s 程度を示し、基礎地盤は、Vs=200~420m/s 程度に分布した。比抵抗は、 ρ =50~480 Q · m程 度の範囲で分布し、場所によって 100 Q · m以下の比抵抗値を示すところがあった。

4.5 統合物理探査の調査結果の 定性的解釈

統合物理探査結果を定性的に把握表現 するために、手引きによれば、比抵抗と S 波速度、この両者の同一地点の物性指 標を割り当てて座標で示すクロスプロッ ト図面作成を行って検討するものとされ ており、本業務もこの図を念頭に評価を 行った。図-8 はその概念図で、左図は、 浸透性・液状化を評価するもので、土質粒度



と剛性の関係から浸透に対する安全性を評価する模式図であり、左上方向は緩んだ砂質土や礫質度に比 定されることから高透水性で危険領域、右の下方向は締まった細粒土に比定されることから難透水性と 判断され安全領域と計るものである。さらに、右図は粒度,剛性と耐震性の関係を示したもので、右側上 部は、締まった砂質土や礫質土の分布する範囲で、高強度であると判断でき変形特性に対して安全領域 域と推測することができ、反対に左下方向は、粘性で緩く危険であると判断する領域である。このよう に、S 波速度と比抵抗の断面構造をその両者の高低の組み合わせで評価して閾値を設け危険箇所を抽出 するものがクロスプロットによる定性評価手法である。

紙面の都合もあり、結果のみとするが、堤体と基礎地盤により各河川調査地点の統合物理探査の結果 を整理解析して、調査の任意点の座標をクロスプロットした結果が下図である。



図-9渡良瀬川 S波速度と比抵抗のクロスプットの定性的解釈図

渡良瀬川の堤体の分布範囲は、天端測線の方が小段測線に比べ密集しており、ばらつきが小さい。S 波 速度分布は、堤体が天端測線で110~200m/s、小段測線で80~200m/sであり、密集域は小段側線のほう が低速度側にある。基礎地盤では、天端測線で140~220m/sと範囲が狭く、小段測線で100~350m/sと 分布範囲が広い。比抵抗分布は、堤体が天端測線で50~200Ω・m、小段測線で20~350Ω・m と分布範 囲が広く基礎地盤は、天端測線で25~100Ω・m、小段測線で12Ω・m~300Ω・m 程度分布範囲が広い。



図-10 烏川 S波速度と比抵抗のクロスプットの定性的解釈図

烏川のS波速度分布は、堤体が130~190m/sで、基礎地盤が180~360m/s程度と範囲が広く、比抵抗 分布は、堤体が150~350Ω・m程度、基礎地盤が50~350Ω・m程度と分布範囲が広い。堤体は団子状に 密集しており相関関係が認められない。



図-11 富士川 S波速度と比抵抗のクロスプットの定性的解釈図

富士川の分布範囲は、堤体の方が基礎地盤に比べ密集しており、ばらつきが小さく、S 波速度分布は、 堤体が 200~300m/s で、基礎地盤が 280~420m/s 程度と範囲が広い。比抵抗分布は、堤体が 800~1300Ω ・m 程度、基礎地盤が 750~1100Ω・m 程度となった。



図-12 小貝川 S波速度と比抵抗のクロスプットの定性的解釈図

小貝川の堤体は図の左下、基礎地盤は右上に分布し、全体的には正の相関傾向が認められ、分布範囲は、 堤体の方が基礎地盤に比べ密集しておりばらつきが小さい。S波速度分布は、堤体が150~400m/s、基礎 地盤が200~420m/s程度で、比抵抗分布は、堤体が50~200Ω・m程度、基礎地盤が60~500Ω・m程度 となった。

4.6 統合物理探査結果から見た堤防の安全性評価結果

各河川調査地点のクロスプロット図面を用いて、土質の区分を行いこの結果をもとに反映させて安全 評価断面図の構築を行った。

1) 渡良瀬川の評価

安全性が低い可能性を示唆された箇所(赤)が天端に比べ小段で広く厚く堆積しており、開削結果からは天端測線で安全性が低いとされた箇所と、小段測線のそれとは同じ時期に築堤された層だと考えられる。また、小段の結果では距離程 550m より終点側が堤体、基礎地盤ともに柔らかい粘性土に区分される。迅速図によるとこの境界より下流側 300m 程度は川・沼、上流側は沼地とされており、堆積環境の違いが反映されたものと考えられる。



2) 烏川の評価

堤体、基礎地盤それぞれで概ね均質な地盤状況である事が伺え、距離程 255m 付近の既存ボーリングに よると、堤体・基礎地盤ともに礫質土であるため、調査区間全体が礫質土であることを示唆していると 推測され、その中、距離程 50m 付近 堤体と基礎地盤の境界付近に安全性が低いと区分された箇所(赤) が分布していると思われる。



図-14 安全性評価断面図 烏川右岸 16.9~17.3k 付近

3) 富士川の評価

堤体、基礎地盤それぞれで概ね均質な地盤状況である事が伺え、その中で、基礎地盤の距離程 20~35m 区間と 180~195m 区間に安全性が低いと区分された箇所(赤)が分布する。



図-15 安全性評価断面図 富士川左岸 2.8~3.03k 付近

4) 小貝川の評価

堤体のほとんどは安全性が中~高(黄)と区分され均質だが、局所的に 410~470m 区間に安全性が低いと区分された箇所(赤)が認められる。基礎地盤は、安全性が赤、黄、緑(一部青)と区分されており、500m の短い区間でも堤防縦断方向に土質構成の顕著な違い存在することが分かった。台風 18 号に

よる被災区間(応急対策実施区間)に注目すると、基礎地盤が赤となる区間で、その上部に粘土層の存 在が推定され、これが被覆土層としての役割を果たした可能性も考えられる。



図-16 安全性評価断面図 小貝川左岸 54.4~54.9k 付近

4.7 統合物理探査結果の開削調査結果による検証

統合物理探査結果と既存のボーリングデータを比較して、検証を行った。下図は、御所沼排水樋管開 削調査の堤防の断面で、位置は、渡良瀬川左岸 2.0K+50m 付近である。





18.00

16.00

14.00

12.00

比抵抗

7000

3000

1500

600

300

150

80

40

10

(ohm-m)

S波速度

370

330

290

250

210

170

130

90

50

(m/sec)

関係事務所アンケート

統合物理探査を行った河川事務所への要望や意見のヒアリングを行った。その結果、S 波速度及び比 抵抗から得られた結果による堤防の土質の性状がわからないであるとか、安全性評価を行うS波速度、 比抵抗の数値基準区分(土質区分と硬さの状態)がよく理解できないというものが主な意見であり、そ もそも技術の基本的の説明が必要であると認識した。

Ag

n-

図-19 開削スケッチと統合物理探査結果の比較

AC

5. まとめ

4.8

18.00-

16.00

14.00-

12.00-

統合物理探査の適用性に関する検討結果においては、フォローアップ委員会でもばらつきが大きいと いう指摘があり、大量のデータを重ね合わせると相関性が確認できることが他の研究などから示されて いる。今回の土質試験を含むボーリングデータと統合物理探査データ(S 波速度と比抵抗)をピンポイントで比較しても必ずしも相関性はみられず、クロスプロット解析の閾値を容易に決められないという問題があった。

6. 今後の計画

上記に記述するように、河川堤防における統合物理探査は、土質柱状図との相関性やクロスプロット 解析に技術的な課題を有している。しかし、河川堤防のような長尺で広範囲な土構造物の性状調査を行 うには、従来の物理探査に比べて調査効率が良く、縦断方向の堤体内部あるいは堤体法尻付近の基礎地 盤の安全性を概略的に把握することに有効である。このことから、位置付けとしては統合物理探査によ り縦断方向の安全性の低いと推定される箇所を絞り込み(スクリーニング)やそれに基づき詳細調査を 実施した上で最終的な判断を行うといった適用方法が考えられる。そこで、この技術の抱える課題をカ バーし、有用な活用法を検討しながら、調査精度の向上や職員への研修等を行い、理解を深めて行く方 環境技術課