

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～

平成24年8月24日

関東地方河川堤防復旧技術等検討フォローアップ委員会
及び統合物理探査検討会 合同委員会

目 次

1. 統合物理探査の今後の河川堤防調査に資する
知見
 - i) 明らかになった事項
 - ii) 今後の課題
 - iii) 今後の方向性

2. 参考資料
 - i) 統合物理探査の観測対象区間
 - ii) 統合物理探査の観測方法
 - iii) 統合物理探査の調査方法（手順）
 - iv) 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の流れ

統合物理探査の今後の河川堤防調査に資する知見

関東地方河川堤防復旧技術等フォローアップ委員会
及び統合物理探査検討会 合同委員会

平成23年3月11日に発生した「東北地方太平洋沖地震」等により、関東地方の堤防等河川管理施設は茨城県及び千葉県を中心に多くの被害を受けた。これまで、関東地方の堤防等河川管理施設は洪水による被害は経験しているものの、地震によりこれほどまでに大規模かつ広範囲にわたる被害を受けたことはなかった。また、被害箇所が多数に及ぶこと、出水期までに十分な期間がなかったことから関東地方整備局では出来る限りの対策は実施したものの、本出水期においては水防団待機水位等基準水位の引き下げや平常時を含めた河川巡視体制の強化等により対応してきた。

平成24年度に入ってから度も度々出水を受け、この間、引き下げたはん濫注意水位を上回りかつ被害が無かった場合は、その都度その実績水位まで、はん濫注意水位等を見直ししてきた。

一方、平成24年度の出水期までに、ほとんどの区間で液状化対策を始め堤防の本復旧対策が完了した。

しかしながら、前述のように、地震によりこれほどまでの大規模かつ広範囲に被害を受けたことはなく、見た目上被害が無い堤防においても、視認できない亀裂等がある可能性は否定できない状況にある。

このため、昨年度開催した「関東地方河川堤防復旧技術等検討会」のフォローとして平成24年度の出水期に向けた対応及び堤防の内部状況を把握するために関東地方整備局が実施する統合物理探査結果などにより、通常堤防と同等（被災前の堤防と同等の性能を有する堤防：以下、通常堤防と同等）であるかを評価し、各水位観測所の基準水位を元に戻すことについて、技術的助言を行うとともに、統合物理探査の今後の河川堤防調査に資する知見をとりまとめるため、学識経験者等による「関東地方河川堤防復旧技術等フォローアップ委員会及び統合物理探査検討会合同委員会」を設置し議論を行った。

本合同委員会の3回にわたる議論を踏まえ、見た目では健全に見えても内部の状況が不明であることから、統合物理探査により、浸透に対して堤防の安全性が低いと思われる箇所を抽出し、代表箇所によるボーリング調査を実施し、安全性を評価した。その結果、全ての箇所で通常堤防と同等の評価を得た。

なお、「統合物理探査」とは、非破壊的に複数の物理探査を実施して地表下の物性値を推定し、既存ボーリング結果や、被災原因調査結果及び施工履歴等のデータを加味して総合的に解析することにより、堤体内部の大まかな構造を把握する手法である。

本とりまとめは、浸透に対する堤防の安全性を評価した手順及びその概要を「統合物理探査の今後の河川堤防調査に資する知見」として、とりまとめたものである。

以下に、今回の検討から明らかになった統合物理探査に関する知見をまとめる。

i) 明らかになった事項

i-1 観測関係

統合物理探査で行う牽引式電気探査およびランドストリーマー式表面波探査は、測定効率が従来の探査方法よりも格段に高く、概ね 1.5 か月で 25~30km の探査を実施することができた。電気探査においては、ガードレールや光ファイバー等の電気探査に影響を及ぼす構造物に対しては、その影響を受けない測線配置とすることなどの工夫で、測定精度の低下を回避することができた。また、水の影響を受けることから、降雨時は勿論のこと、降雨量や降雨後の時間経過を考慮するなどの必要があった。表面波探査においては交通振動の影響を回避するため、交通量の少ない時間帯に測定するなどの工夫が必要であった。

測定データはその品質を現場でチェックし、表面波探査における分散曲線や、電気探査における見かけ比抵抗曲線を確認しながら探査を進めた。その結果、測定精度(分解能、値の精度)についても一次スクリーニングとしての適用にあたっては、大きな問題は認められなかった。

以上の留意事項への対応を適切に取ることを前提とすれば、管理延長の長い堤防の大まかな内部構造(S波速度と比抵抗)を探査する手法として、これらの探査方法は経済的にも分解能的にも概ね有効と言える。

なお、今回使用した手法の分解能および探査実績は、以下のとおりである。

分解能：縦断方向には約 10m

深度方向には、浅部で 1 m 程度、8~10m 以深では 2~3m

探査実績(現場測定に要した日数)：実働日数として、ランドストリーマー式表面波探査は、30km を約 1 か月、牽引式電気探査は、30km を約 1 週間で実施することができた。

i-2 S波速度とN値の関係

表面波探査によって得られた S 波速度と N 値の相関は、既往の S 波速度と N 値の関係(たとえば、稲崎, 2005)と整合していたが、バラツキが大きかった。そこで、表面波探査において深部の分解能や精度がやや低下することを考慮し、①ひとつの S 波速度を持つ解析セルに含まれる複数の N 値を平均すること、②深さ 10m 以深のデータは使用しないことにより、両者の相関が若干高くなることが分かった。さらに、土質区分により、オーバーラップする領域は大きいものの、N 値小・低 S 波速度領域が粘性土主体、N 値大・高 S 波速度領域が砂質土~礫質土主体となっている傾向がある。年代別及び堤体、基礎地盤別の S 波速度と N 値関係についても同様の傾向がある。

i-3 比抵抗と粒度特性の関係

電気探査によって得られた比抵抗について、細粒分含有率や20%粒径などの粒度特性との関係を調べたが、相関は不明瞭であった。

i-4 S波速度と比抵抗のクロスプロット解析

図1に、堤体部と基礎地盤部に分けて、S波速度と比抵抗の関係を土質毎に色分けしてプロットしたものを示す。もともと粒度特性は連続的に変化するものであるが、土質を3つに区分していることから、オーバーラップする領域が大きいものの、低速度・低比抵抗領域が粘性土主体、高速度・高比抵抗領域が砂質～礫質土主体となっている傾向がある。

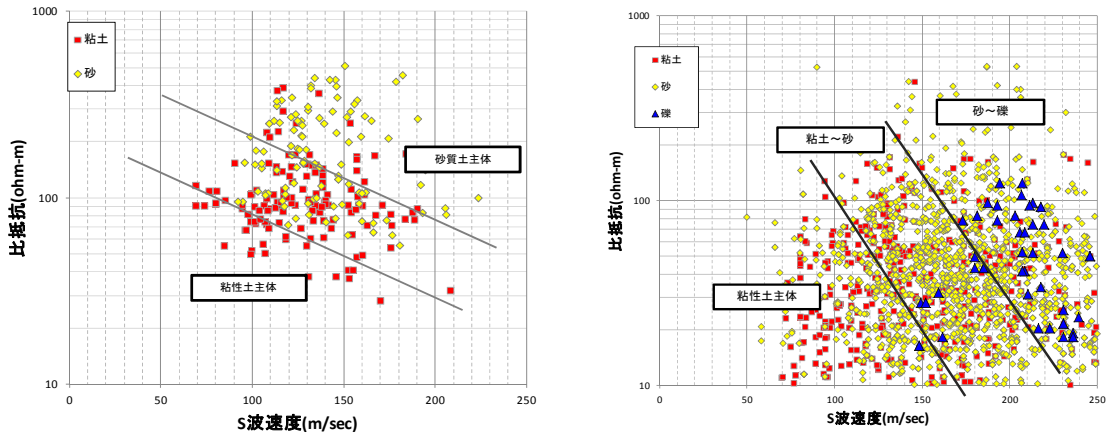


図1 土質別 S 波速度と比抵抗の関係 (左)堤体 (右)基礎地盤

i-5 一次スクリーニング (絞り込み)

S波速度と比抵抗のクロスプロットにもとづき安全性評価区分を行うための「閾値」の設定について、河川毎に被災事例を基に異なる値を使用するのが妥当と判断された。この閾値を用いた安全性評価区分に加えて、各河川での実現象による検証を踏まえて、浸透に対して堤防(特に堤体)の安全性が低いと思われる箇所を抽出することが概ねできた。一次スクリーニング方法としては、S波速度と比抵抗から堤体の状況を「緩く透水性が高い箇所」、「粒径が粗いが締まった箇所」、「透水性は低いが緩い箇所」および「透水性が低く締まった箇所」に区分した。

i -6 詳細調査及び安全性評価

i -5 で抽出した安全性が低いと思われる箇所の中で、最も安全性が低いと思われる、代表箇所において、ボーリング調査を実施し、通常の堤防と同等（被災前の堤防と同等の強度を有する堤防）かどうか確認した。

その結果、すべての箇所で、通常の堤防と同等と評価した。

i -7 総合評価

上記を総合すると、統合物理探査は、被災事例や既往の調査資料の情報と合わせて用いるのであれば、浸透に対して堤防の安全性が低いと思われる箇所の一次スクリーニングの手段として有効と言える。

但し、検証として、探査範囲の代表箇所において開削調査やボーリング調査を実施することが必要である。

ii) 今後の課題

ii-1 データ解析関係

- 1) 現手法は堤防縦断方向の効率的な探査を優先しているため、解像度には限界がある。精度向上のためには、解像度向上あるいは追加調査等が望まれる。
- 2) S波速度とN値の関係には相関は認められるもののバラツキが大きく、S波速度からN値を推定する有意な関係式を導き出すことはできなかった。
- 3) S波速度と比抵抗の関係から、粘性土主体～砂質土主体～砂礫土主体の土質区分を行うことについても、現段階においてはバラツキが大きく、大まかな傾向はみられるものの、明瞭な区分はできなかった。
- 4) クロスプロット解析において評価区分に用いる「閾値」の設定について、今回は河川毎に値を設定したところ、結果的に河川毎に異なる値とするのが妥当との判断となった。今後、さらに詳細な検討を加えデータのバラツキの原因を究明することにより、クロスプロット解析の精度を向上させることが必要である。

ii-2 堤防の維持管理関係

- 1) 小貝川の一部では、地震前に統合物理探査を実施していたため、地震前後の比較ができた。今後、詳細調査により分析することが必要であるが、地震等による堤防の緩みなどを判定するうえでは、事前の測定が望まれる。
- 2) 利根川下流部では堤防復旧のために堤防開削が実施され、統合物理探査結果の詳細な検証が可能となった。今後も堤防開削時には事前に統合物理探査を実施し、その精度向上及び課題を明確にしていくことが望まれる。
- 3) 安全性評価結果の良否を判断するためには、土質（ボーリングデータ）、漏水履歴、過去の地震被害、被災原因、施工履歴（成り立ち）などについて十分な情報が必要である。本検討では、既往資料の活用にあたり、漏水などの被災の原因や変状位置が不明確なものがあり、貴重な資料ではあるが一部に使用できないものがあつた。今後の堤防の維持管理のために重要な情報でもあり、適切にまとめておくことが必要である。

ii-3 精度の高い安全性評価手法の確立

探査結果の解釈や安全性評価の手法は、手引き書（※）に示されているが、ルーチン的に進めることが出来る作業とはなっていない。今回、新たに探査結果の検証として、実現象による検証を試みた。今後はこのような検証を取り入れ、更に探査結果の精度を向上させるための手法を確立していくことが必要である。このため、安全性の評価の手順については、比較的簡易に精度が確保できる方法をさらに模索する必要がある。

※ 河川堤防安全性評価のための統合物理探査適用の手引き

(平成24年3月：独立行政法人 土木研究所、一般社団法人 物理探査学会)

ii-4 データベースの構築と活用

様々な既往資料を収集し、既往資料整理表にまとめるなどして、探査結果の解釈への有効利用を試みた。しかし、膨大な資料を効率的にコンパイルしたり、探査結果と定量的に比較したりすることには困難が伴った。今後は、探査結果と、既往資料を効率的、定量的、客観的に比較し、関連付ける手法の確立が重要となる。そのためにデータベースの構築と活用が望まれる。

iii) 今後の方向性

iii-1 データ解析関係

現手法については、河川堤防の縦断方向の土層構成を、経済的かつ高速に調査することを優先させている。そのため、解像度に限界があり、精度向上のためには、解像度向上のための技術開発や、詳細調査にあたっては、横断的調査を始め、これを考慮した追加調査等が望まれる。

また、S波速度とN値の関係及びS波速度と比抵抗の関係については、バラツキの原因究明を始め、河川毎さらに一定の区間毎の特性を明確にする必要がある。

「閾値」の設定については、河川毎に特性が異なることから、河川毎さらには一定の区間毎に設定すべきと考えられるが、統一的な値を設定できるのか、検討の余地がある。このため、同様にバラツキの原因究明を始め、河川毎、区間毎の特性を明確にすることが必要である。

iii-2 堤防の維持管理関係

堤防の変状を捉え、必要に応じてボーリング調査をするなどして安全な堤防の維持管理に役立てていくために、平常時の統合物理探査データを蓄積するとともに、堤防開削時には事前に統合物理探査を実施し、データを収集・分析していくことが望まれる。

安全性評価結果の良否を判断するための情報としては、以下の事項に配慮して堤防データベースに蓄積することが望ましい。

- ・オールコアボーリングによる土質データを蓄積。
- ・漏水記録は、基盤漏水と堤体漏水の種別・正確な位置を記録。
- ・変状の位置は、緯度経度、天端、小段、法面等できるだけ詳細な位置を記録。

iii-3 浸透に対する堤防の安全性評価の検討方法について

浸透に対する堤防の安全性評価の検討方法は、今回測定されたデータのバラツキが大きいものの、検討結果を踏まえると以下のとおりである。

ア) 震災前の堤防の緩み領域相当のN値や透水係数などを設定し、それに相当するS波速度と比抵抗を閾値とする方法により被災箇所や健全箇所等の代表断面の評価図を作成する。

イ) 堤防の被災箇所と健全箇所等の実現象の検証に基づいてS波速度と比抵抗の閾値を再設定し、全体の評価図を作成する。

図2に今回使用した地震後の浸透に対する堤防の安全性評価流れ図を示す。

今後は、浸透に対する堤防の安全度評価方法の精度向上として、N値とS波速度、透水係数と比抵抗及び土質別S波速度と比抵抗の関係について、バラツキの原因を究明し、相関を高めるための技術的な検討が必要である。

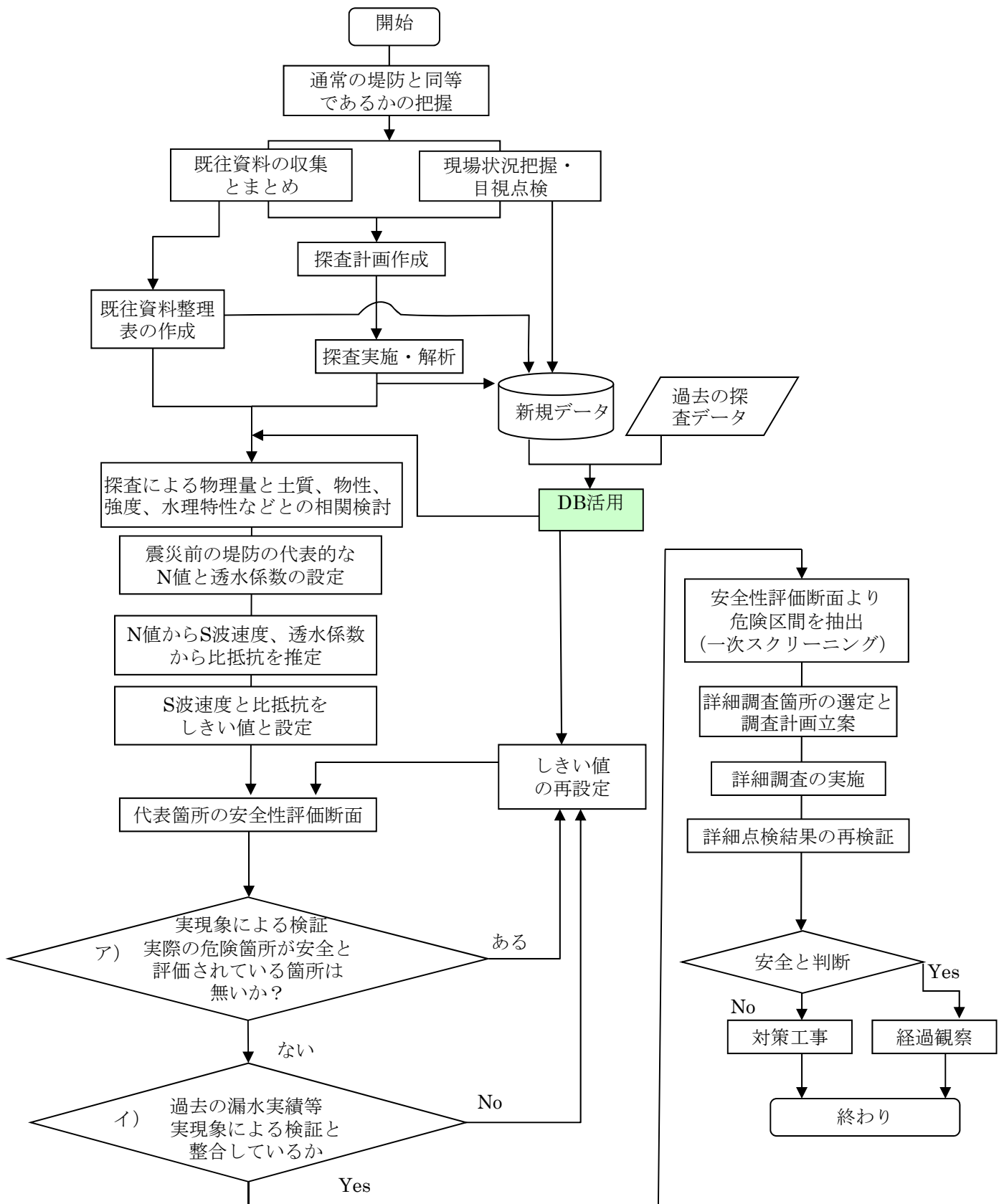


図 2 今回使用した統合物理探査による地震後の浸透に対する堤防の安全性評価の流れ図

今回の検討を支援する目的で、事務局／物理探査学会では、統合物理探査のデータベース(以後、DBと記す)の試行版を作成し、データ整理等に活用した。

図3にデータベースのトップページを示し、図4に基本的な構成図を示す。

河川堤防は、管理範囲が非常に長く、また恒久的に維持されるべきものであるという特徴がある。このことから、調査・点検・補修・被災などの履歴は、デジタル管理され、情報の蓄積と再利用が必要となる。統合物理探査のデータ蓄積にあたっては、堤防に沿って連続的に情報を整理するとともに、評価結果の解析等に活用する既存のボーリングデータや堤防概略点検結果などの常用情報と関連付けた、総合的なデータベースシステムを構築する必要がある。

また、蓄積した評価結果等は、平常時の河川巡視や、出水時の防災情報等に活用することが望ましい。

河川堤防の統合物理探査データベース

管理者名：関東地整

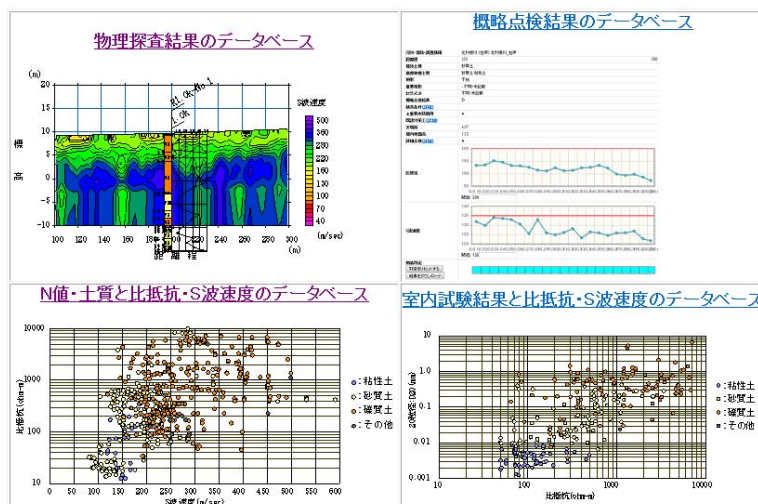


図3 統合物理探査データベースのホームページ

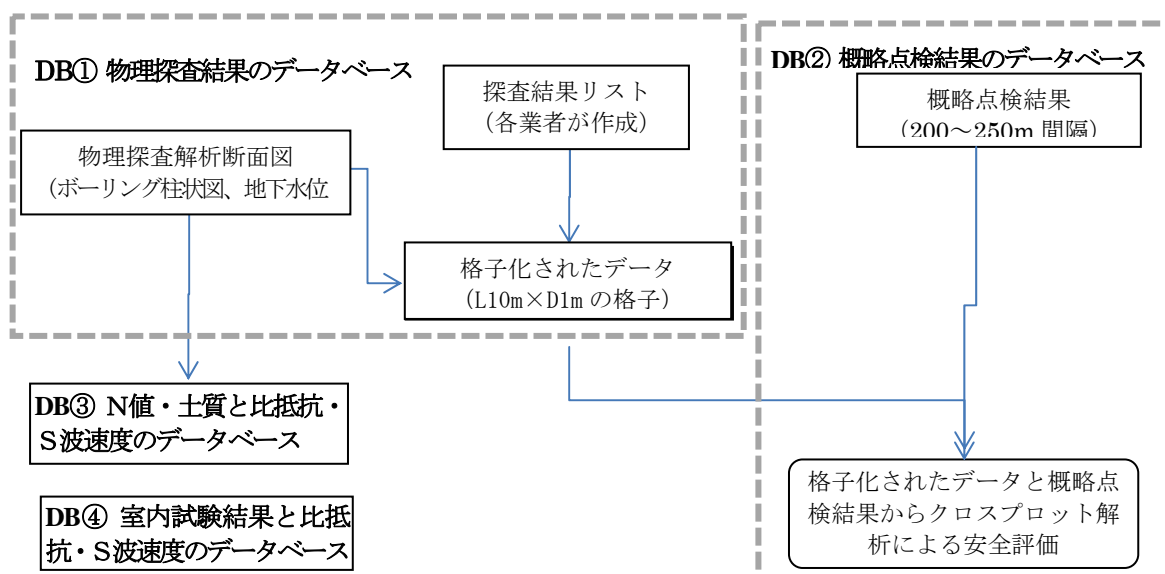


図4 統合物理探査データベースの基本構成

参考資料

- i) 統合物理探査の観測対象区間・・・・・・・・・・・・・・・・参 1
- ii) 統合物理探査の観測方法・・・・・・・・・・・・・・・・参 2
- iii) 統合物理探査の調査方法（手順）・・・・・・・・参 4
- iv) 統合物理探査を利用した浸透に対する堤防の安全性評価手法の流れ・・参 6

i) 統合物理探査の観測対象区間

■観測対象区間の設定方法

1) 既往資料の整理

- ・地形条件(河口部、旧川跡、干拓堤、旧湿地部等)
- ・地盤条件(堤体及び基礎地盤の土質、N値、砂質土層厚、堤防比高等)
- ・被災条件(変状分布、天端沈下量等)

2) 被災リスクの分類

想定される被災リスクを4つのランクに分け、被災発生の可能性が大きいと予想される範囲を設定

3) 観測対象区間の設定

上記の対象資料等から、観測対象区間を設定

観測対象区間の設定

河川事務所	調査範囲	設定延長	探査区間設定上の選定基準
霞ヶ浦河川事務所	西浦・北利根川堤防 西浦:121km 北利根川:18km	25.75km	<p>◆3.11の地震において干拓堤区間が多く被災したため、干拓堤区間を設定した。</p> <p>◆被災ランクC(被災の可能性大)及びB(被災の可能性あり)のうち、下記による区間を設定した。</p> <p>①地震による変状区間 ②沈下量が0.1m以上発生した区間 ③堤防比高が2m以上の区間</p>
	北浦右岸・左岸上流堤防 右岸:36.25km 左岸:27.5km	25.89km	
	北浦左岸下流・鱈川・常陸川堤防 全体:54.36km	25.0km	
小計	257.11km	76.64km	
利根川下流河川事務所	利根川下流右岸堤防 全体:27.0km	21.23km	<p>◆須賀・横利根区間は、平成23年度の出水を経験して安全性が確認されていることから、出水位が低かった小貝川下流部と利根川下流の上流部について調査範囲を設定した。特に被災箇所を優先した。</p> <p>また、堤防高さ(10m程度)や堤防横断方向に一樣でない区間(旧川跡、旧堤)については、補助測線(堤防小段など)を配置した。</p>
	利根川下流左岸堤防 利根川左岸:17.2km 小貝川:14.0km	30.1km (山付等を除く)	
小計	58.2km	51.33km	
下館河川事務所	小貝川 32.14km(左右岸)	32.14km (左右岸)	<p>◆平成23年度の出水を経験して安全性が確認されている。</p> <p>しかし、平地の蛇行河川であり、旧川箇所でも被災したため、被災箇所または、旧川箇所を対象として設定した。</p>
小計	32.14km	32.14km	
合計延長(km)	347.45km	160.11km	

※上記、調査範囲については、距離標間延長。設置延長については、探査側線実延長とした。

ii) 統合物理探査の観測方法

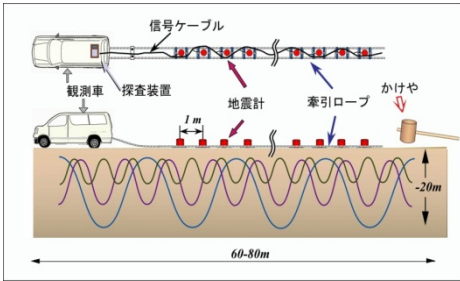
■ 統合物理探査の測定方法

今回の統合物理探査では、「河川堤防安全性評価のための統合物理探査適用の手引き(案)」に基づき、ランドストリーマーを用いた表面波探査と牽引式電気探査を組み合わせ、S波速度と地層比抵抗を測定した。なお、対象区間の地盤の比抵抗が低比抵抗の場合、スリングラム法電磁探査により測定を実施した

※「河川堤防安全性評価のための統合物理探査適用の手引き(案)」

(平成24年3月 土木研究所・一般社団法人 物理探査学会編)

ランドストリーマー表面波探査法

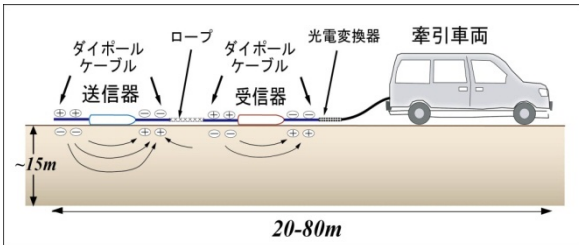


■ 波長によって伝播する深さが異なり、速度も異なるという表面波の分散特性に基づいて地下のS波速度構造を推定する手法。土研で開発した「ランドストリーマー」を用いることで、作業効率・解析精度が向上し、世界的にも広く利用されるようになった。



利根川下流堤防上でのランドストリーマー表面波探査風景

牽引式電気探査法

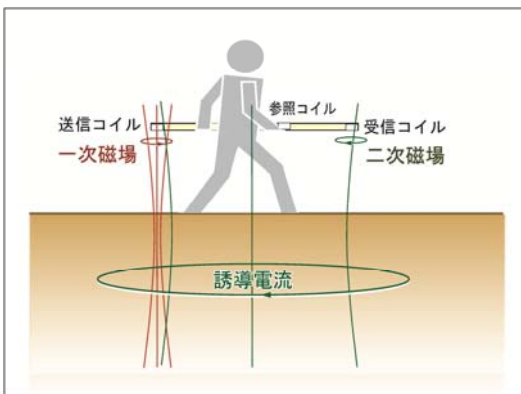


■ 送信部のダイポールケーブルに正負の交流電荷を与えると、地盤との間にコンデンサーが形成され地盤に電流が流れる。これにより受信部側付近の地盤にも電流が流れるので、受信部のダイポールケーブル区間に電位差が発生する。この電位差から地下の比抵抗分布を求める。



小貝川堤防での牽引式電気探査風景

スリングラム電磁探査法



■ 送信コイルで交流磁場を発生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導電率の関数となることを利用して地下の比抵抗分布を推定する。



霞ヶ浦堤防でのスリングラム電磁探査風景

■ 探査測線の設定方法

1) 測線の設定

- ・堤防天端(縦断方向)に測線を設定
- ・短い測線を細切れに設定するのではなく、数km程度の連続的な測線を設定

2) 副測線の設置

- ・何れの探査手法も地表から深度10-15m程度までの地盤を探査対象としているため、堤体高さが10m程度以上の大規模堤防では、小段や法尻に副測線を設けることとした。

3) 対象区間の選定

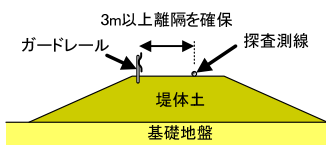
- ・地震による被災規模が中規模から軽微な区間を主な探査対象として設定した。
- ・探査結果の解釈精度を高めるために、健全な堤防や大規模被災区間にも適宜測線を選定した。
- ・見かけ上、被災の無い区間でも、「旧河道・旧落掘」、「干拓地」などの潜在的に被災する可能性が比較的高い箇所について選定した。

4) 注意事項

- ・鋼矢板、交通量の多い道路、ガードレールなどの測定データに障害を与える可能性のある構造物からは、適切な離隔をとることとした。

探査区間の設定方法(小貝川の例)

① 法肩にガードレール、鉄柵など長手の金属構造物がある場合



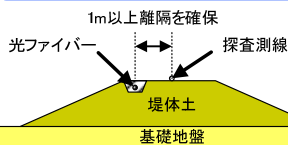
法肩にガードレール等、長手の金属構造物が敷設されている場合、それらの影響を避けるため、ガードレール等から3m以上離隔を確保して測線を配置する。

※3m程度の離隔でも、測定値に影響が認められる場合、可能な限り離隔を大きく確保する。



橋梁等との柵り付け区間では、のり肩にガードレールが敷設している場合があるため、上記に示した事項に留意し測線を配置する。

② 法肩に光ファイバーが埋設されている場合



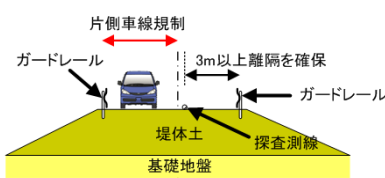
法肩に光ファイバーが埋設している場合、光ファイバーの影響を避けるため、光ファイバーから1m以上離隔を確保して測線を配置する。

※保護管が鉄製の場合は①に準じた考えで測線を配置する。



小貝川の堤防では、堤防天端中央～川裏側のり肩の間に光ファイバーが埋設されているため、上記に示した事項に留意し測線を配置する。

③ 堤防天端の交通量が多い場合

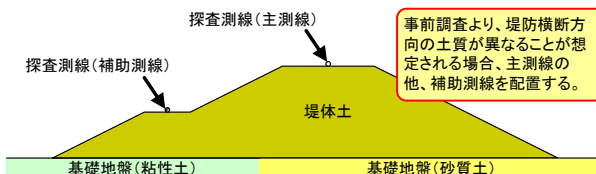


堤防天端が道路として利用され交通量が多い場合、交通規制を行い(片側通行)、測線を配置する。なお、その場合、ガードレールから3m以上の離隔を確保する。また、交通量の少ない時間帯に作業を行う。



小貝川左岸大和橋～福岡堰の間の堤防天端は国道354号線として利用され、交通量も多い状況にあるこのような区間は、上記に示した事項に留意し測線を配置する。

④ 基礎地盤が異なることが想定される場合



事前調査より、堤防横断方向の土質が異なることが想定される場合、主測線の他、補助測線を配置する。

既存の地質調査結果等により堤防横断方向の基礎地盤の土質が異なることが想定される場合、左記に示した事項に留意し測線を配置する。

iii) 統合物理探査の調査方法(手順)

■統合物理探査を利用した調査方法(手順)

統合物理探査を利用した調査結果と既往データの相関を確認し、浸透に対する堤防の安全性の評価に係る閾値を設定し、検証を行い、安全性が低いと判断された箇所については詳細調査を実施し、総合評価を行った。

① 既往資料整理シートにより、堤防状況等を整理



② 統合物理探査の実施



③ 既往データと観測したデータの相関を確認



④ 閾値の設定



⑤ 実現象による検証

(危険と推定された箇所、安全と推定された箇所等での物理探査結果による検証)



⑥ 浸透に対する堤防の安全性評価

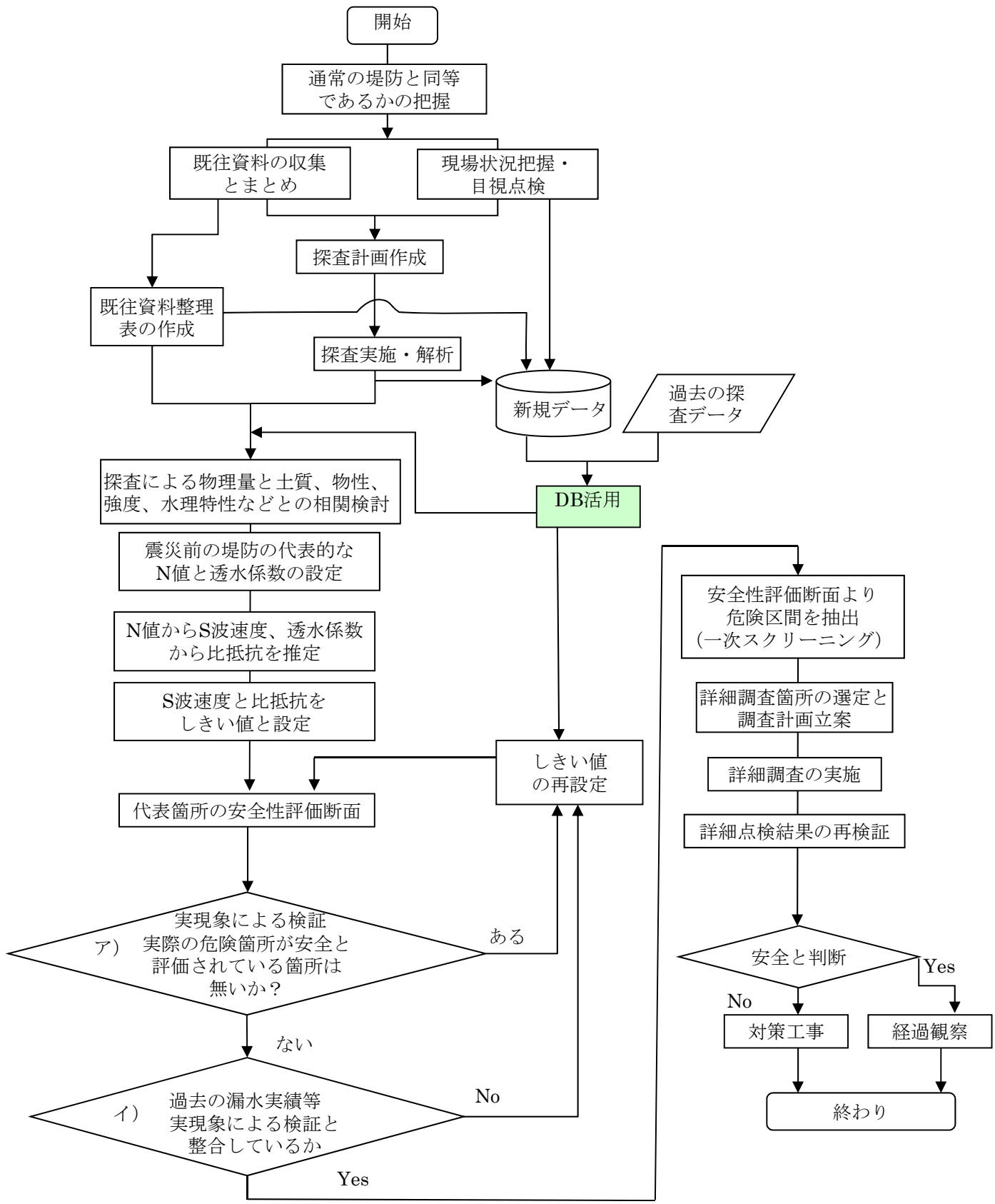


⑦ 安全性が低い箇所における詳細調査



⑧ 総合評価

浸透に対する堤防の安全性を評価するため、閾値の検討を踏まえた流れ図を以下に示す。



今回使用した統合物理探査による地震後の浸透に対する堤防の安全性評価の流れ図

iv) 統合物理探査を利用した 浸透に対する堤防の安全性評価手法の流れ

1) 既往資料整理シート

- 統合物理探査により得られた結果を基に、各種データとの相関性を求めるために、各河川毎に下記事項を整理した。
 - ・地盤条件(堤体土質、基礎地盤土質、治水地形分類)
 - ・堤防条件(堤防高、堤防沈下量)
 - ・既往点検結果(概略点検結果、詳細点検位置・結果、平均動水勾配)
 - ・被災条件(被災箇所・事象:出水、地震)
 - ・重要水防箇所
 - ・横断工作物(樋門・樋管、水門、橋梁、堰)
 - ・既設対策工、工事区間(地震被災区間)
 - ・探査区間
 - ・堤体安全性評価(浸透)
 - ・基礎地盤安全性評価(浸透)
 - ・総合安全性評価結果
 - ・地震危険度判定結果(基礎地盤)

既往資料整理シート

【利根川】

河川名・左右岸(区間)	利根川右岸(58.0k~68.0k)																															
距離標(km)	58.5	59.0	59.5	60.0	60.5	61.0	61.5	62.0	62.5	63.0	63.5	64.0	64.5	65.0	65.5	66.0	66.5	67.0	67.5	68.0												
地盤条件	[Color-coded grid for soil conditions]																															
堤防条件	[Color-coded grid for dike conditions]																															
既往点検結果	[Color-coded grid for inspection results]																															
はん濫注水量における平均動水勾配	[Numerical grid for water level data]																															
被災条件	[Color-coded grid for disaster conditions]																															
重要水防箇所	[Color-coded grid for important water defense points]																															
横断構造物	[Color-coded grid for cross-structure objects]																															
既設対策工(鋼矢板等)	[Color-coded grid for existing countermeasures]																															
工事区間	[Color-coded grid for construction areas]																															
探査区間	[Color-coded grid for investigation areas]																															
堤体安全性評価結果(浸透)	[Color-coded grid for dike safety evaluation]																															
基礎地盤安全性評価結果(浸透)	[Color-coded grid for foundation safety evaluation]																															
総合安全性評価結果	[Color-coded grid for overall safety evaluation]																															
地震危険度判定結果(基礎地盤)	[Color-coded grid for seismic hazard evaluation]																															

土質区分

- G/S: 礫質土/砂質土
- S/G: 砂質土/礫質土
- S: 砂質土
- S/C: 砂質土/粘性土
- C/S: 粘性土/砂質土
- C: 粘性土

地震被災ランク

- 甚大: 堤防機能喪失
- 大: HWL以下の損傷
- 中: HWL以上の損傷
- 軽微: 表層部だけの損傷
- 堤内外: 点的液状化(堤内、堤外)

詳細点検結果

- 68.5: OUT
- 72.5: SAFE

枠内数字は検討距離

構造物箇所

- : 樋門・樋管
- ◎: 水門
- △: 橋梁
- : 堰

被災箇所・事象(地震)

- 天: 天端
- 裏: 川裏
- 表: 川表

統合物理探査による安全性評価結果

a b c d1 d2

総合安全性評価結果

- OK: 震災前と同等の安全性
- OUT: 震災前の安全性未確保

堤体の閾値

S波速度(m/s): 125, 150

比抵抗(Q・m)

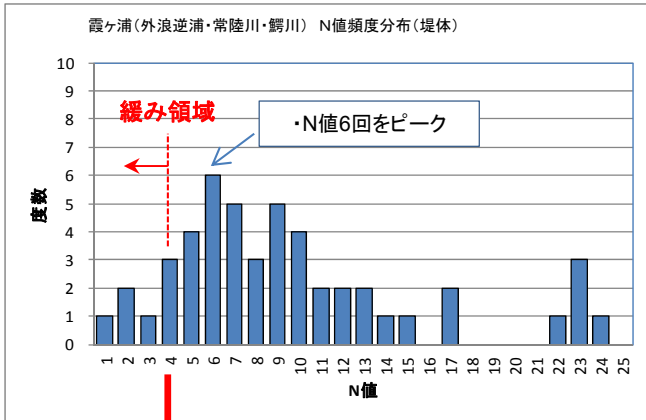
凡例

2) 閾値の設定方法

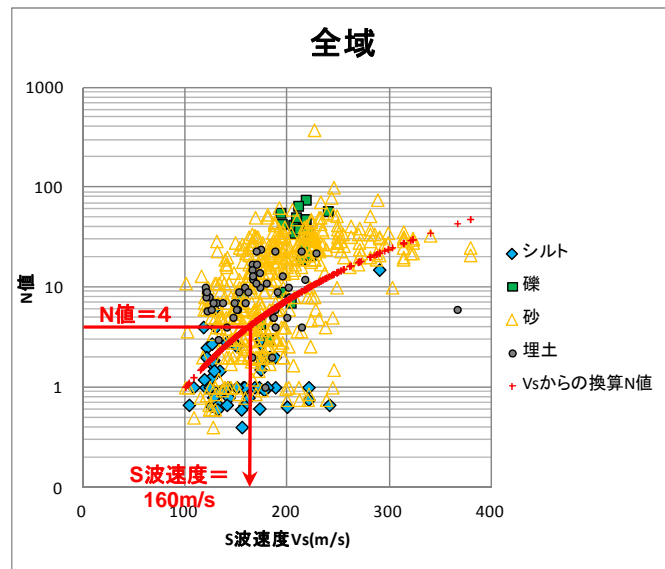
■ 震災前の堤防の緩み領域のN値や透水係数などを評価し、それに相当するS波速度と比抵抗を閾値として設定する。

N値からS波速度を設定(霞ヶ浦の例)

- ・既往ボーリングデータから堤体のN値頻度分布図を作成
- ・N値6回をピークに概ね1~15回に分布している



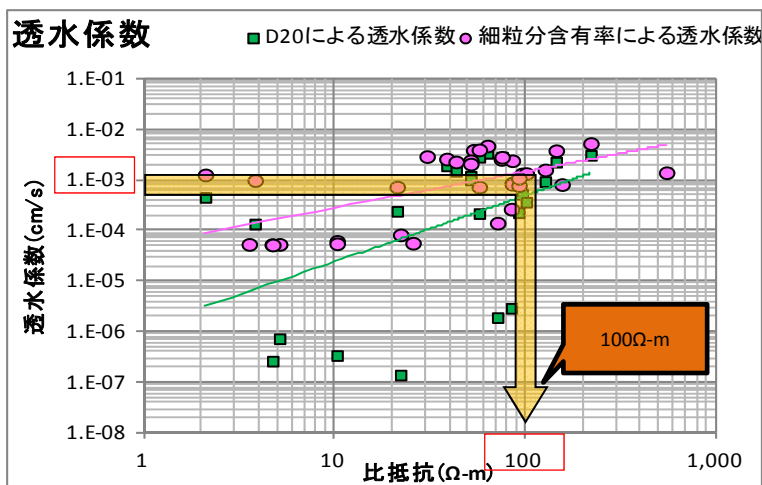
ピーク値 N=6より小さい
N値=4以下を緩み域と設定



N値からS波速度を設定
(N値=4以下、Vs=160m/s以下)

透水係数から比抵抗を設定(霞ヶ浦の例)

- ・既往土質試験結果より、透水係数と比抵抗図を作成



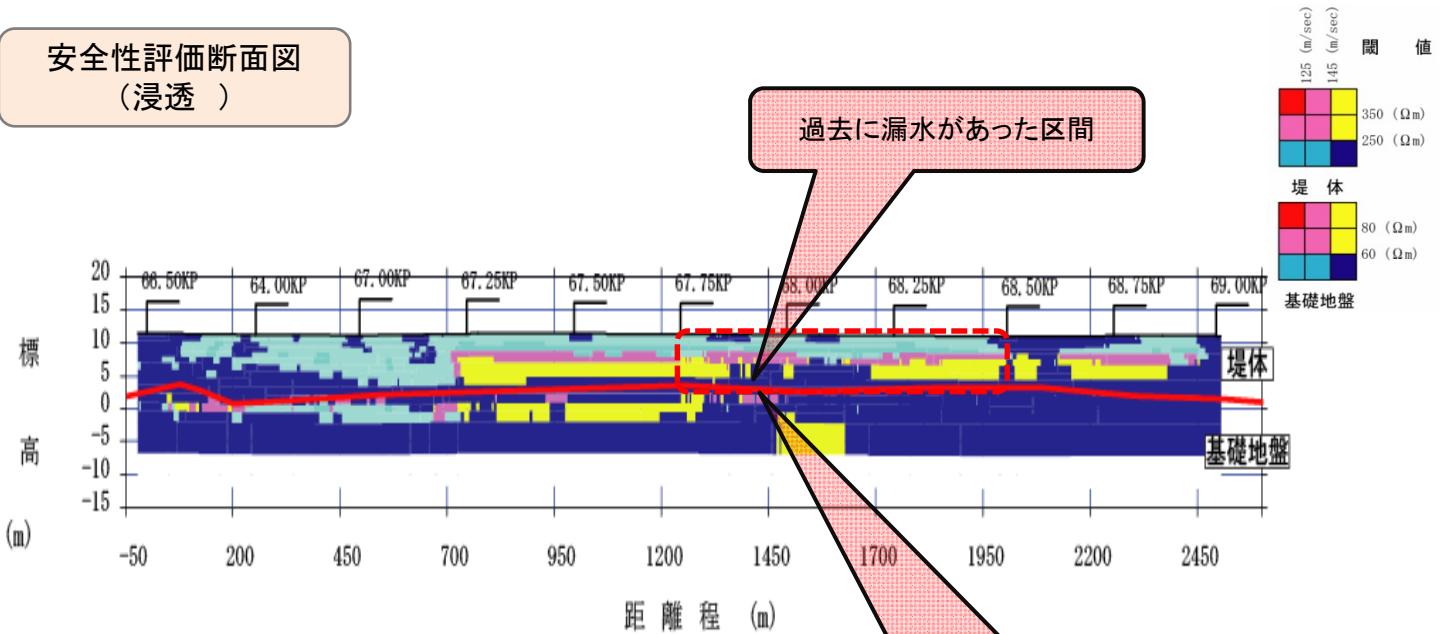
透水係数から比抵抗を設定
(透水係数 1.0×10^{-3} 、比抵抗 $100 \Omega \cdot m$ 以上)

この場合の閾値は、Vs=160m/s以下、比抵抗 $100 \Omega \cdot m$ 以上となる

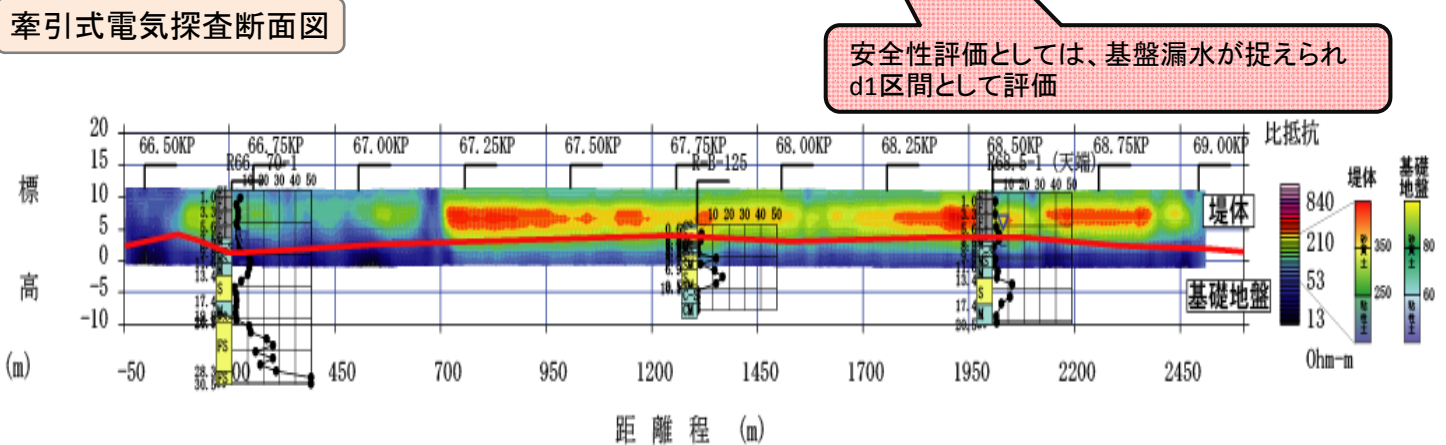
3) 実現象による検証

(通常の堤防よりも安全性が低いと推定された区間の例)

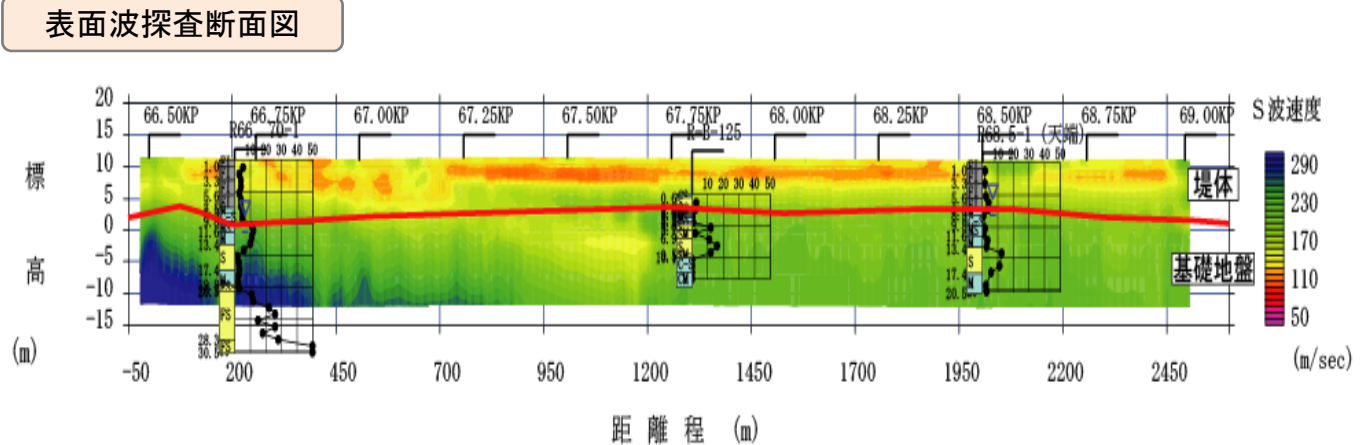
安全性評価断面図
(浸透)



牽引式電気探査断面図



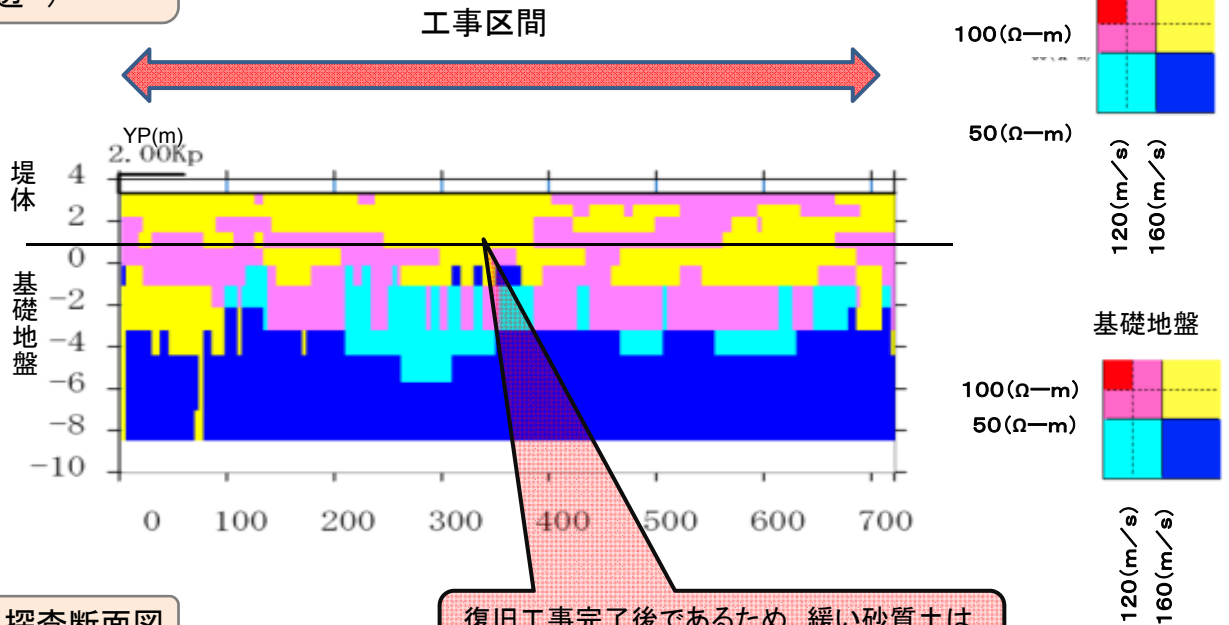
表面波探査断面図



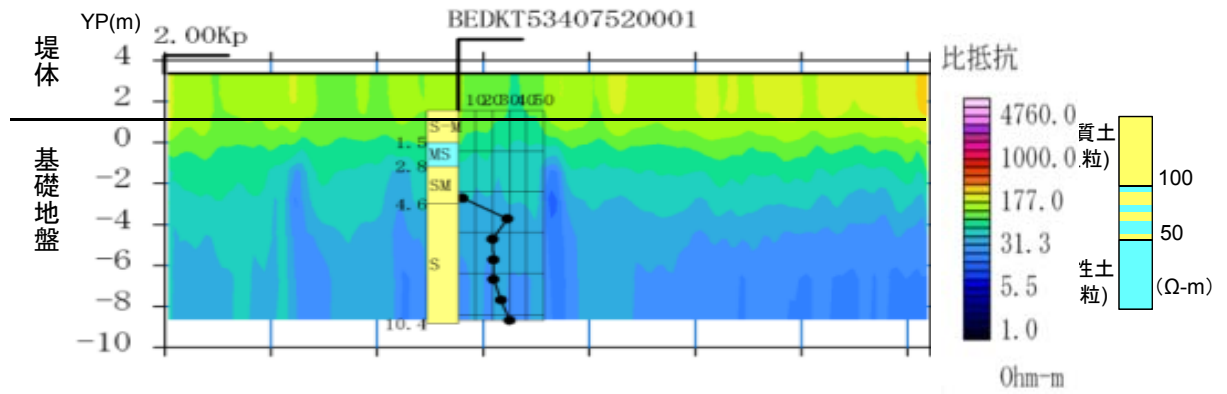
3) 実現象による検証

(震災の被災区間ですでに復旧対策が完了した区間の例)

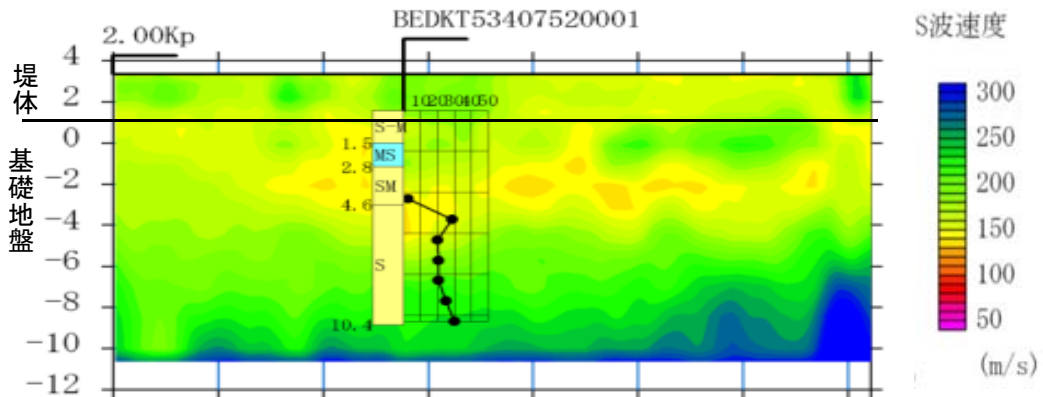
安全性評価断面図
(浸透)



牽引式電気探査断面図



表面波探査断面図

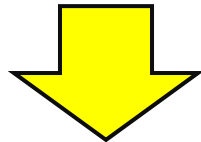
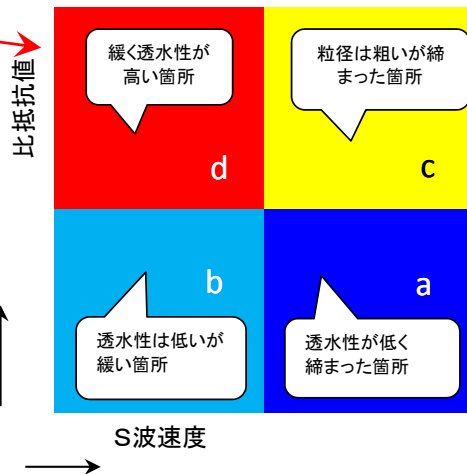


4) 浸透に対する堤防の安全性評価の考え方

- 統合物理探査を利用した調査結果から浸透に対する堤防の安全性評価断面図の作成を行う
 - ・ 設定した閾値を用いて、S波速度断面、比抵抗断面から堤防の安全性評価断面を作成
 - ・ 堤防の安全性評価ランクは、S波速度と比抵抗の関係から4種類の評価(a~d)にランク分けを行った。
 - ・ 特に安全性が低い範囲(dランク)では、d1とd2の二つに分け、浸透に対する安全性が低い範囲として抽出する。

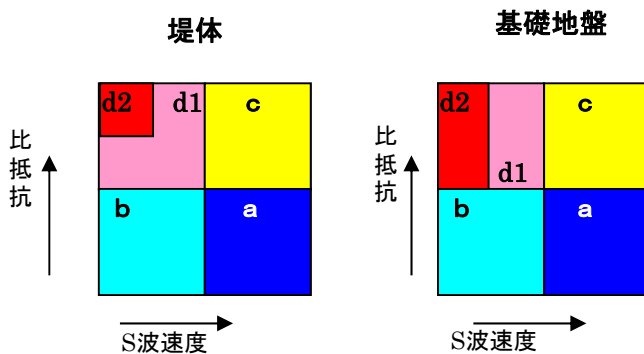
S波速度と比抵抗の関係から4種類の評価

浸透に対する危険性が高いと考えられる領域



特に浸透に対する危険性が高い考えられる領域
dランクをd1、d2に細区分して評価

堤防の浸透に対する安全性評価ランク(S波速度と比抵抗の関係)



安全性評価ランクのイメージ

堤防の浸透に対する
安全性評価ランクのイメージ

- a: 安全性が高い
- b: 安全性がやや高い
- c: 安全性がやや高い
- d1: 安全性がやや低い
- d2: 安全性が低い

5) 浸透に対する堤防の安全性評価の妥当性の検証

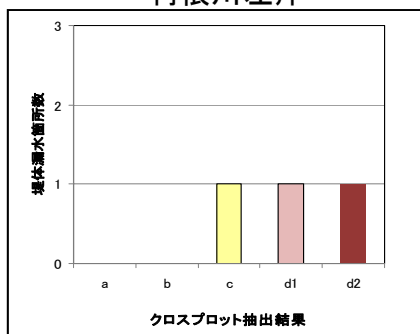
■ 統合物理探査で得られた結果より、堤体浸透に対する安全性評価についてとりまとめを行う。
また、被災実績や詳細点検結果等と比較して結果の妥当性について評価する。

- 1) 被災履歴(漏水箇所)に対する安全性評価区分をチェック
- 2) S波速度と比抵抗の関係図に、被災履歴(堤体漏水箇所)をプロット及びチェックし、今回の統合物理探査結果が概ね妥当と判断した。

堤体漏水箇所の評価(利根川の例)

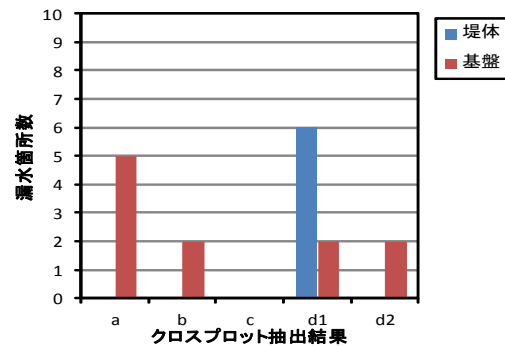
・ 既往洪水での被災履歴(堤防漏水箇所)をクロスプロット図に投影する

利根川左岸



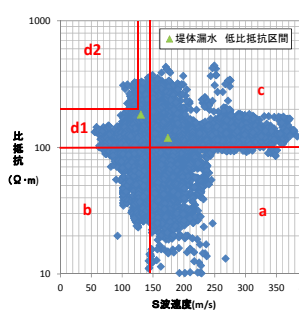
利根川左岸：堤体漏水3箇所

利根川右岸

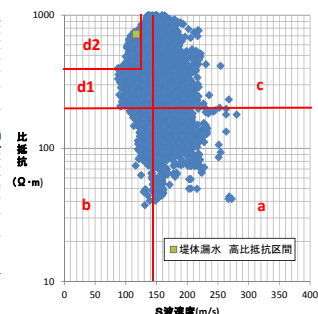


利根川右岸：堤体漏水6箇所

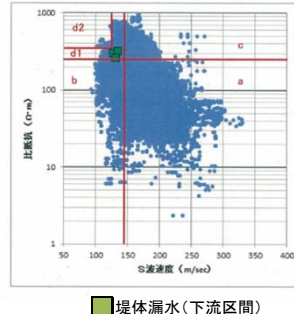
栄橋76.5k付近より上流



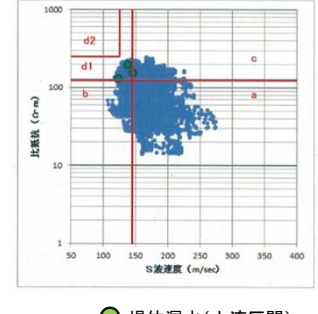
栄橋76.5k付近より下流



栄橋76.5k付近より上流



栄橋76.5k付近より下流



堤体漏水箇所(利根川下流区間)

堤体漏水箇所(全部) : 9箇所、

堤体漏水箇所(d2、d1箇所) : 8箇所

安全性低下と思われる箇所の適合度 : 8箇所 / 9箇所 = 約9割

■ 安全性評価とりまとめ

統合物理探査を利用した調査結果と過去の被災履歴の箇所が、利根川下流区間では約9割が一致した。そのため、今回の統合物理探査の調査結果は妥当と判断することができる。

5) 浸透に対する堤防の安全性評価結果

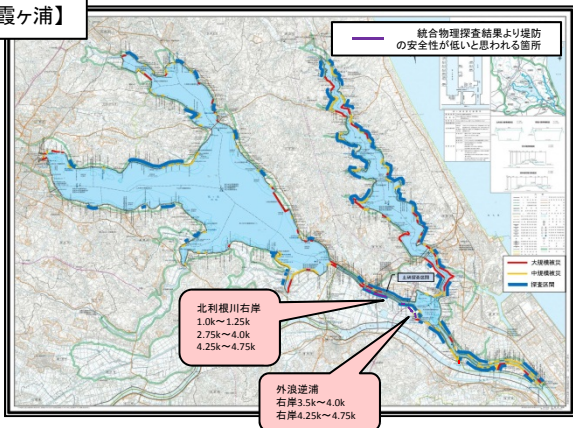
■ 相対的に安全性が低いと評価された区間は以下のとおり

河川毎の安全性評価結果

事務所名	安全性が低いと推定された範囲			
	河川名	左右岸	区 間	延長 (km)
霞ヶ浦	外浪逆浦	右岸	3.50 k ~ 4.00 k	0.50
			4.25 k ~ 4.75 k	0.50
	北利根川	右岸	1.00 k ~ 1.25 k	0.25
			2.75 k ~ 4.00 k	1.25
			4.25 k ~ 4.75 k	0.50
小計			3.00	
利根川下流	利根川	左岸	68.00 k ~ 68.50 k	0.50
			69.00 k ~ 71.25 k	2.25
			71.25 k ~ 74.00 k	2.75
		右岸	59.80 k ~ 61.00 k	1.20
			63.30 k ~ 63.80 k	0.50
	右岸	63.70 k ~ 64.10 k	0.40	
		67.20 k ~ 67.75 k	0.55	
		77.60 k ~ 77.70 k	0.10	
	82.90 k ~ 83.00 k	0.10		
	小計			8.35
下館	小貝川	左岸	36.00 k ~ 36.20 k	0.20
			33.80 k ~ 34.20 k	0.40
			36.60 k ~ 36.80 k	0.20
			38.00 k ~ 38.20 k	0.20
			38.80 k ~ 39.20 k	0.40
		右岸	39.80 k ~ 40.00 k	0.20
			44.40 k ~ 44.60 k	0.20
			46.00 k ~ 47.80 k	1.80
			52.20 k ~ 52.40 k	0.20
			小計	
合計			15.15	

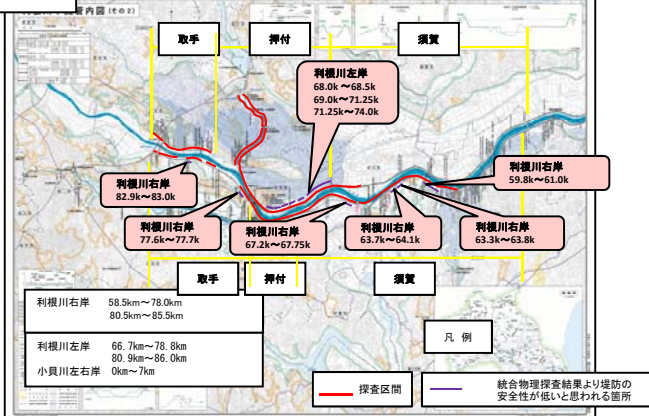
安全性が低いと評価された区間

【霞ヶ浦】

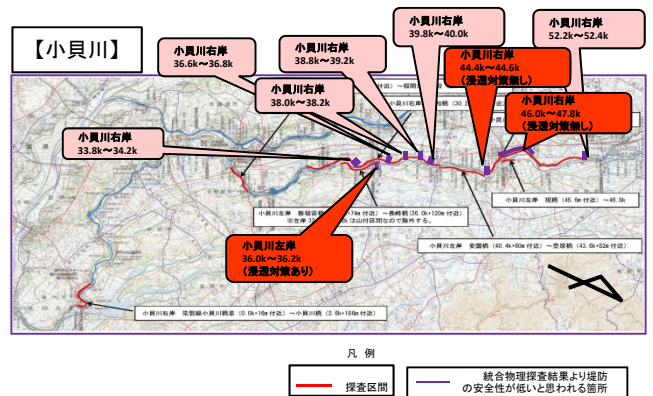


事務所名	探查範囲 (km)	安全性が低いと推定される区間 (km)	安全性が低いと推定された区間の割合
霞ヶ浦	76.64	3.00	3.9%
利根川下流	51.33	8.35	16.3%
下館	32.14	3.80	11.8%
合計	160.11	15.15	9.5%

【利根川】



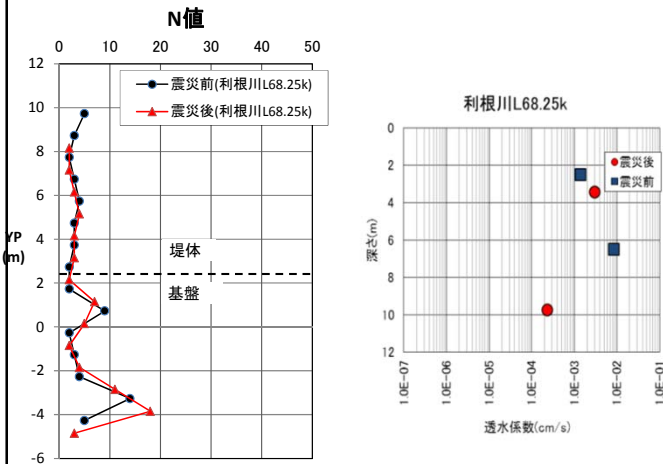
【小貝川】



6) 安全性が低い箇所における詳細調査

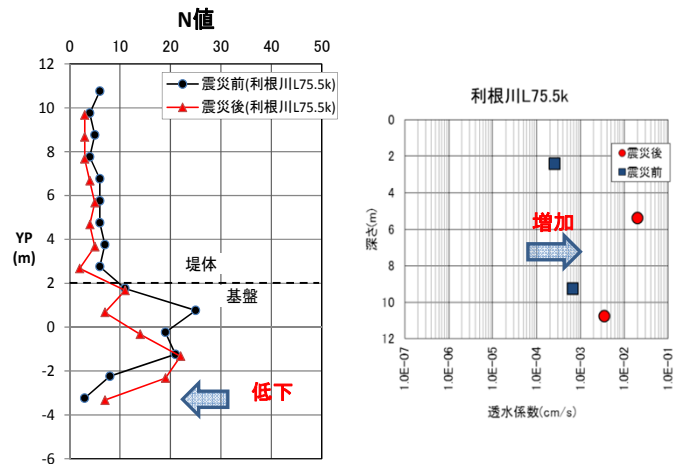
- 安全性が低いと推定される範囲では、詳細調査として追加の地質調査等（N値、透水係数）を行い震災前と比較を行うことで、安全性を評価する。震災前後の耐浸透性の機能が低下（N値の低下、透水係数の増加）している箇所では、浸透流解析を行い安全性照査を実施した。
- 詳細調査の結果、地震前と同等の性能であると判断された。

震災前後の耐浸透性の機能がほぼ同等の箇所(利根川の例)

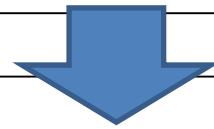


- ほとんどの区間では、耐浸透性の機能（N値、透水係数）が従来と同等の性能と推定される。

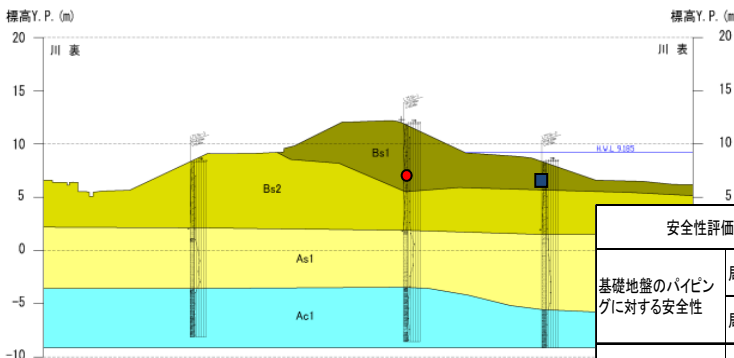
震災前後の耐浸透性の機能が低下している箇所(利根川の例)



- 一部区間では耐浸透性の機能の低下（N値の低下、透水係数の増加）が見られた。そのため、浸透流解析を実施し安全性の照査を実施した。



◆ 浸透に対する安全性照査(利根川左岸75.5k)



安全性照査結果		
評価項目	震災前	震災後
パイピング 評価	iv ih	0.563 0.490
すべり 評価	川裏Fs 川表Fs	2.077 2.254

安全性評価項目	照査基準	震災前	照査結果	震災後	照査結果	判定	備考
基礎地盤のパイピングに対する安全性	局所動水勾配iv	<0.5	0.563	OUT	0.490	OK	Bs1の透水係数が大きくなったことで、浸潤線の上昇が抑止され、パイピングに対する安全率が上昇した。
	局所動水勾配ih	<0.5	0.588	OUT	0.496	OK	
堤体のすべり破壊に対する安全性	川裏すべりFs	≥1.44	2.077	OK	1.776	OK	川裏すべりFsは地震前と比べて低下したものの、照査基準を上回った。
	川表すべりFs	≥1.0	2.119	OK	2.254	OK	

- 基礎地盤のパイピング、堤体のすべり破壊ともに安全と評価

7) 統合物理探査を実施していない区間の推定方法

■地震前後のN値、透水係数の変化

1) 探査区間の詳細調査結果から、耐浸透性の機能(N値、透水係数)が地震前後で変化が無いことを確認した。(図-1)

2) 地震による被災の大きかった箇所におけるN値や透水係数は変化していないことから、被災の小さかった未探査区間も同等と推定した。

■地震前後のS波速度、比抵抗の変化

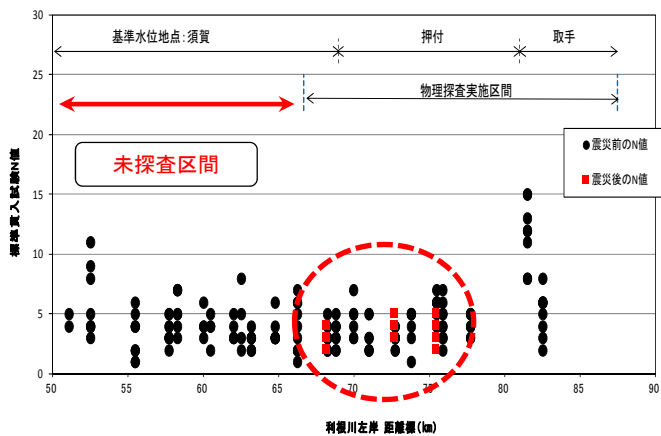
1) 漏水箇所及びその近傍の地震前のN値や透水係数から、S波速度や比抵抗を換算したものと、その地盤の地震後の統合物理探査結果を比較した結果、ほぼ同等な値となった。(図-2)

■未探査区間の推定

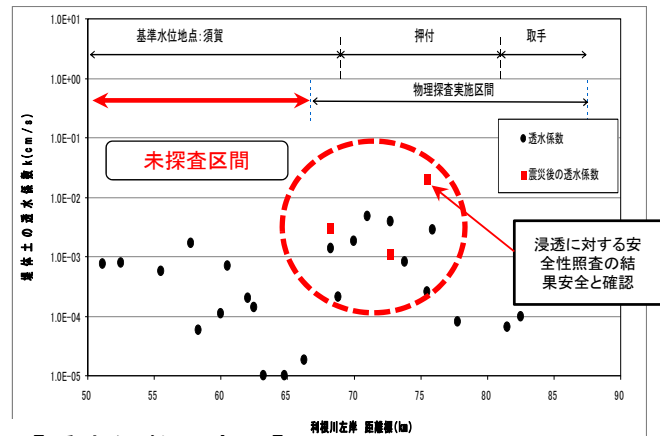
1) 漏水箇所及びその近傍の統合物理探査実測、漏水箇所及び未探査区間のN値や透水係数から、S波速度と比抵抗値を換算したのものと、漏水箇所はd2、d1と元々漏水の危険性を有する区間に該当し、未探査区間はd2、d1に該当しないこととなった。(図-2)

2) 以上のことから、未探査区間は、安全と評価した。

地震前後のN値、透水係数の変化(図-1)



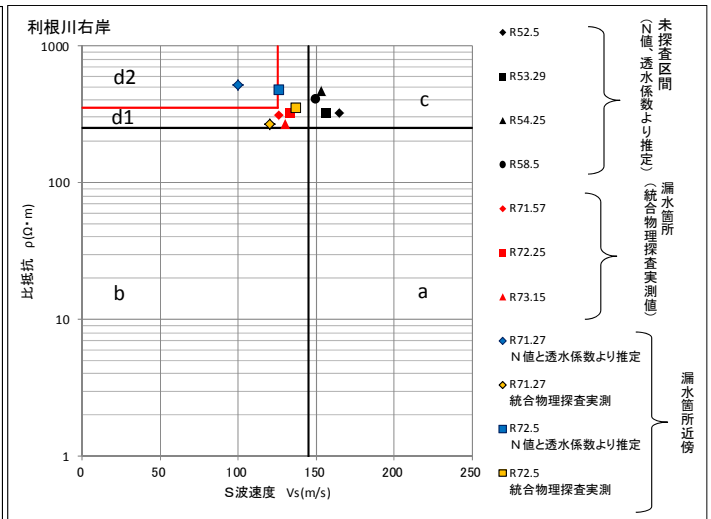
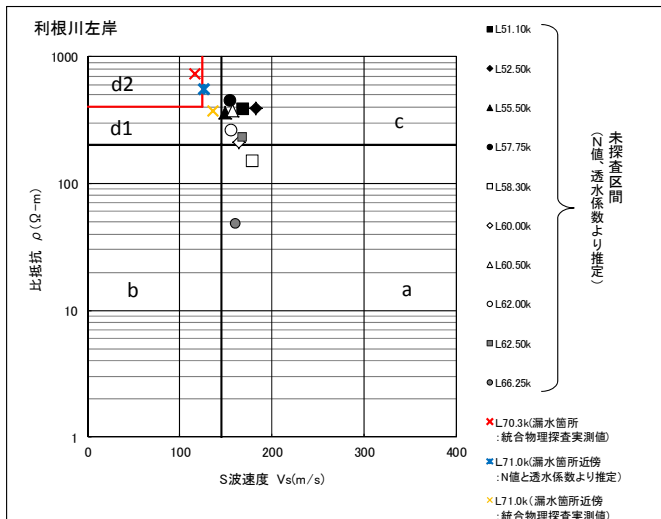
【N値の変化】



【透水係数の変化】

※探査区間のN値や透水係数は、地震前後で変化がないことを確認した。

未探査区間の推定(図-2)

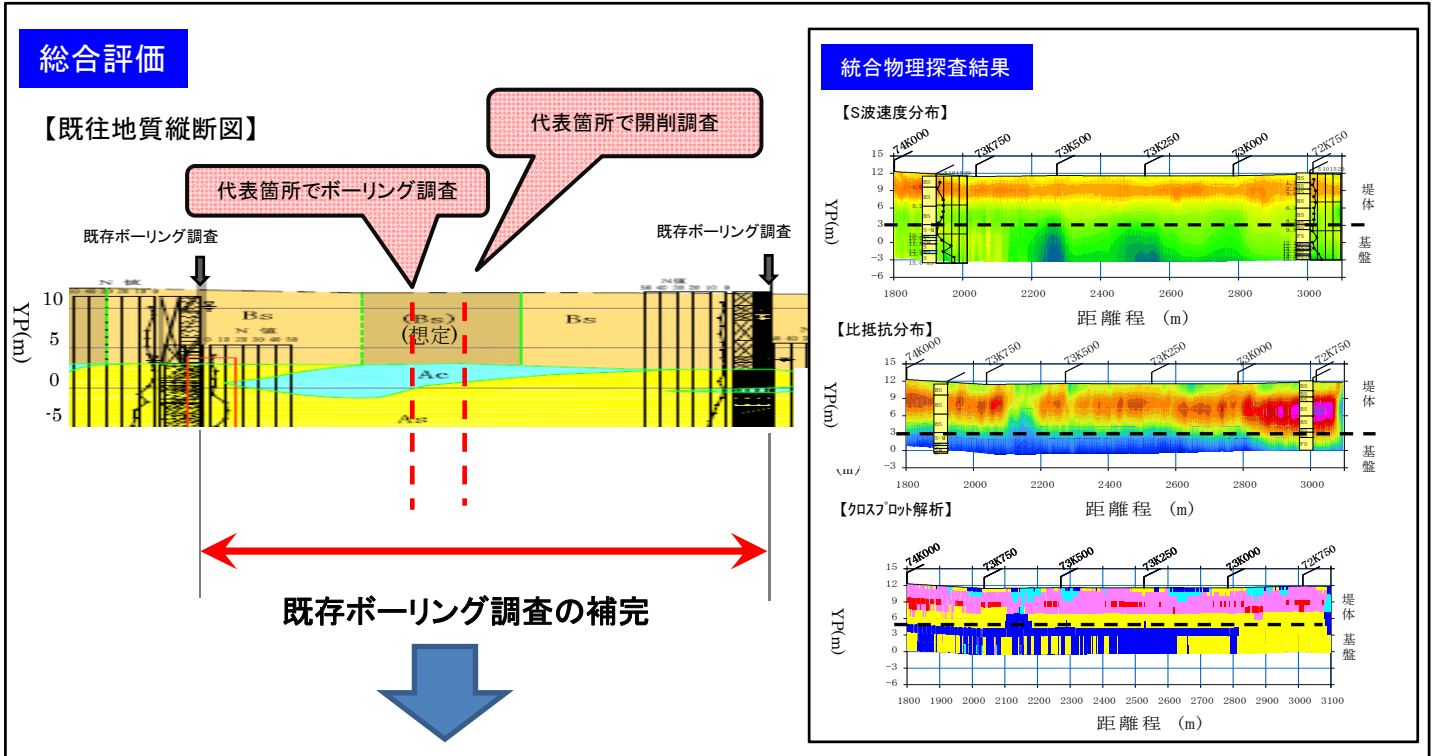


8) 総合評価

■ 統合物理探査による総合評価

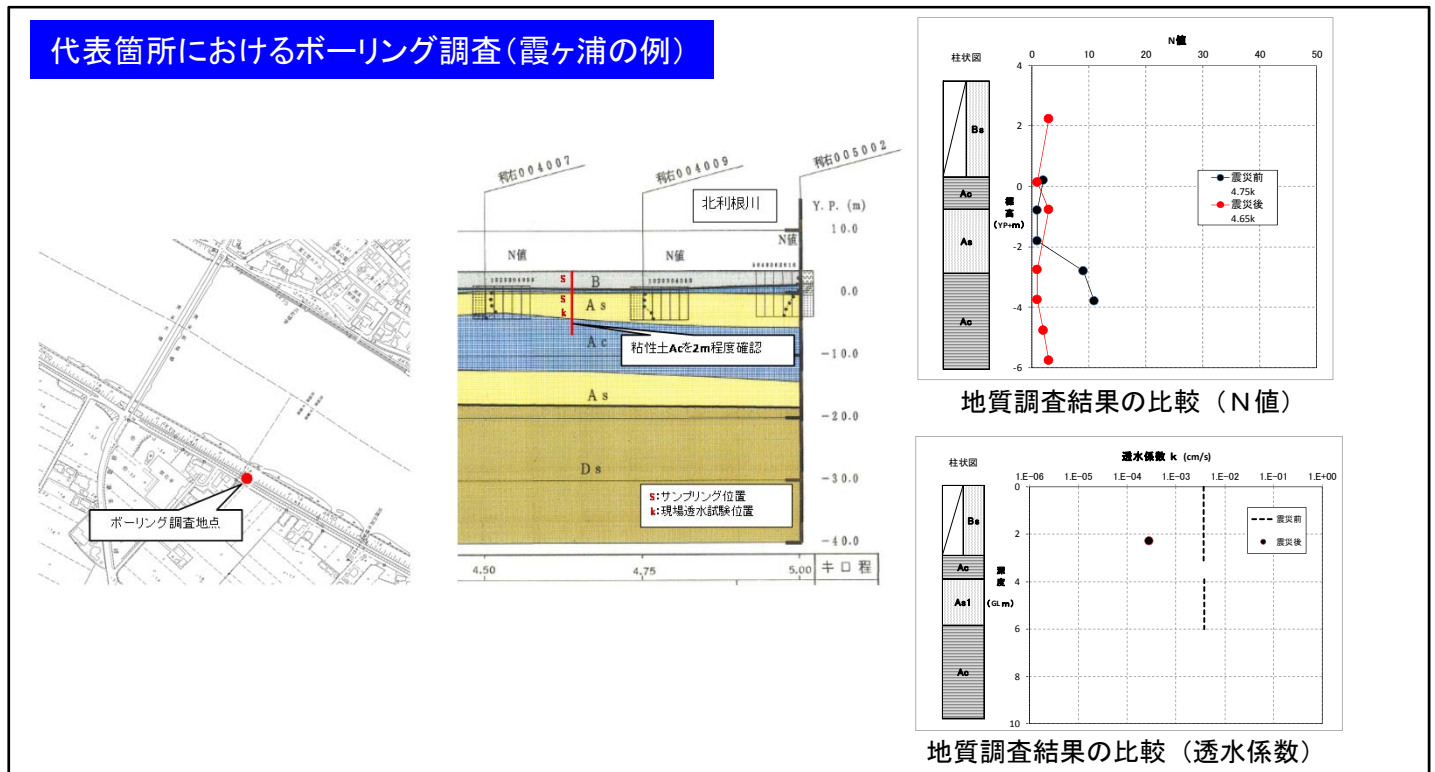
統合物理探査は、既往ボーリング調査を補完して堤体の安全性評価に関する一次スクリーニングを行う手法として、有効であると評価できる。

但し、検証として、探査範囲の代表箇所において開削調査やボーリング調査を実施することが必要。



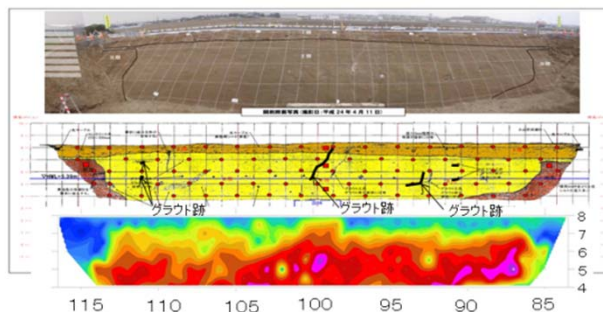
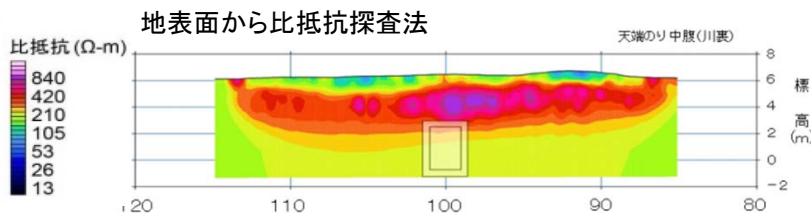
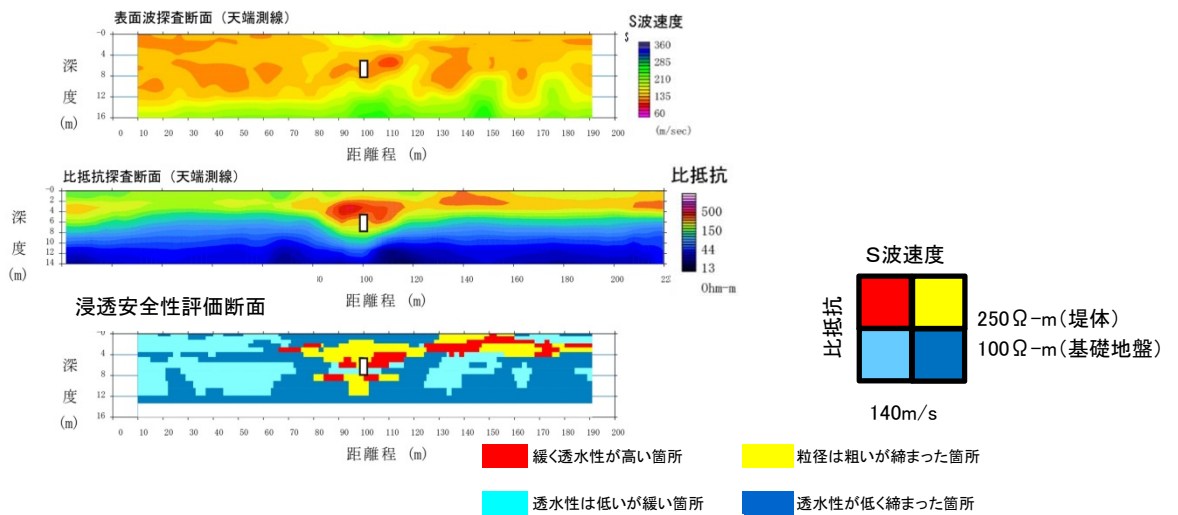
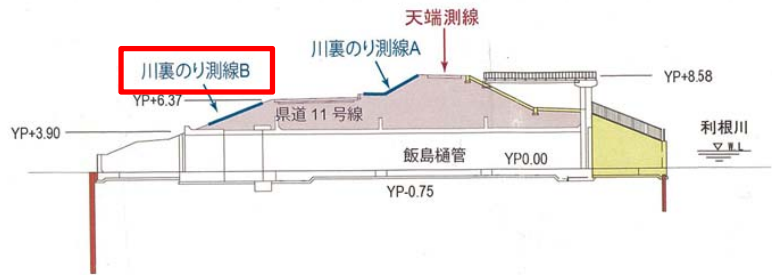
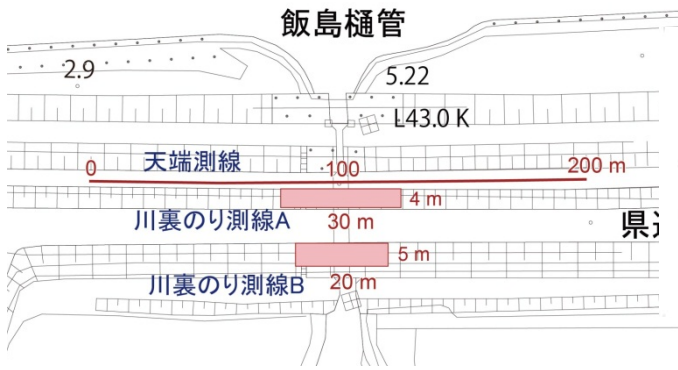
探査範囲の代表箇所において開削調査やボーリング調査を行う

代表箇所におけるボーリング調査（霞ヶ浦の例）



【参考事例】堤防開削前後の統合物理探査結果の比較

- 樋管箇所の堤防開削前の統合物理探査結果と堤防開削後の統合物理探査結果を下記に示す。
- 浸透安全性評価断面から樋管部の周りや樋管下部に緩んだ箇所が見える。
- 地表面からと開削法面からの比抵抗探査法結果は、ほとんど一致しており、上記浸透安全性評価断面を参考にすると緩んだ砂層が樋管部分の上部に存在することが、地表面から確認できたことが証明された。



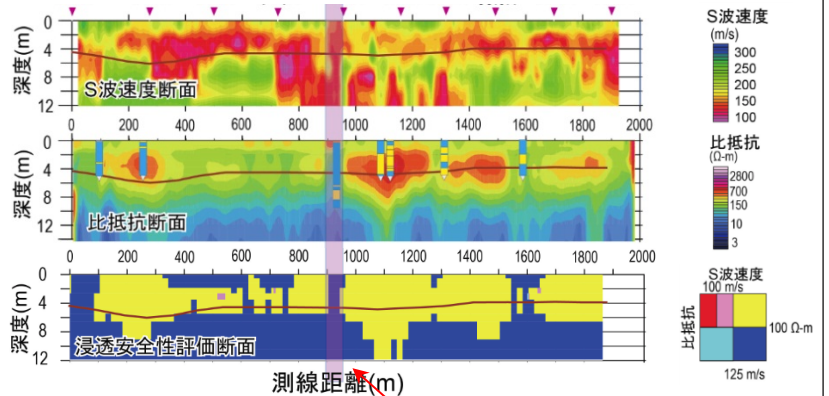
【参考事例】地震前後の堤防物性の変化

■ 試行的に堤防の統合物理探査を実施した箇所、地震後に統合物理探査を実施し、地震前後のS波速度及び比抵抗を比較した結果を下記(図-1、2)に示す。

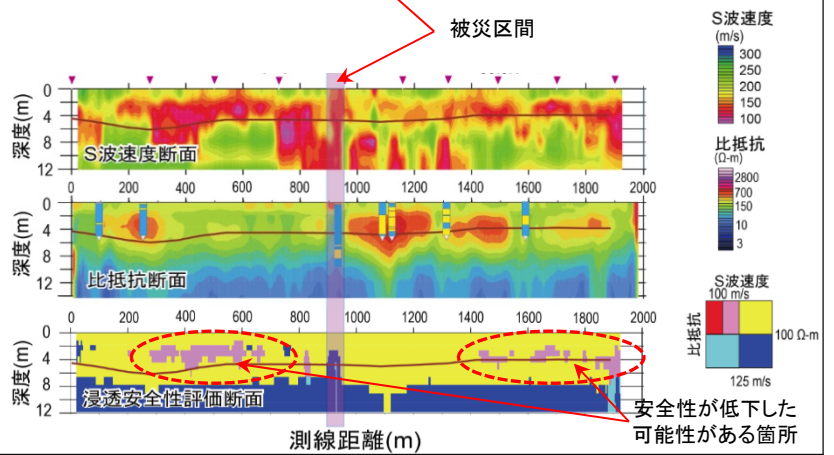
■ 下記(図-1、2)は、地震前後のS波速度及び比抵抗の比較である。ボーリング調査等による詳細調査は未だ確認されていないが、図-1によると地震前後で浸透に対する安全度が低下した可能性が読み取れる。また、図-2によると地震前後のS波速度や比抵抗の変化が読み取れる。今後、このような物性値の変化を詳細調査により、さらに分析していくことが必要である

地震前後での統合物理探査断面の変化(図-1)

2005年8月探査(地震前)



2011年7月探査(地震後)



地震前後での堤防物性の変化(図-2)

