

河川堤防の弱点箇所抽出への 統合物理探査技術の活用

平成 25 年 3 月 7 日

(独)土木研究所 地質・地盤研究グループ
物理探査技術担当 上席研究員 稲崎 富士

河川堤防の弱点箇所抽出への統合物理探査の活用

1. 河川堤防の特徴と点検調査の課題

- 1.1 防災構造物としての河川堤防の特徴
- 1.2 「安全」検査の視点
- 1.3 不均質性のオーダーと検出の要件
- 1.4 河川堤防における安全点検調査の現況と課題

2. 統合物理探査とは

- 2.1 「物理探査」とは
- 2.2 物理探査の種類
- 2.3 河川堤防適用物理探査の要件
- 2.4 河川堤防調査における物理探査の位置づけ
- 2.5 「統合」の意義と目的
- 2.6 河川堤防の統合物理探査構成手法
- 2.7 統合物理探査による弱点箇所抽出・評価の流れ

3. 統合物理探査の適用事例

- 3.1 浸透被災堤防調査事例
- 3.2 地震被災堤防調査例
- 3.3 開削部調査例

1. 河川堤防の特徴と点検調査の課題

1.1 防災構造物としての河川堤防の特徴

● 防災構造物としての河川堤防の特徴

- 人造構造物
- 連続した長大な線状の防災構造物
- 長い治水の歴史を反映して複雑な内部構造
- 樋門や水門が構造上の不連続な部分として存在

● 横断方向にも縦断方向にも極めて不均質

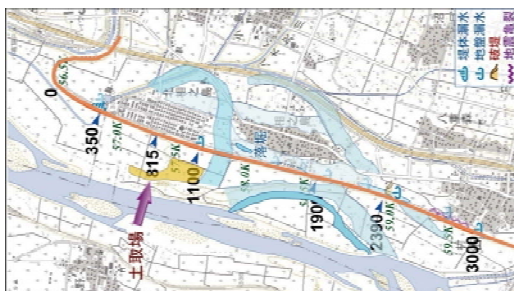
簡易全品検査・サンプル検査だけでは異常部(不均質構造)の検出・健全性評価が困難

● 河川堤防の設計・安全管理上の特徴

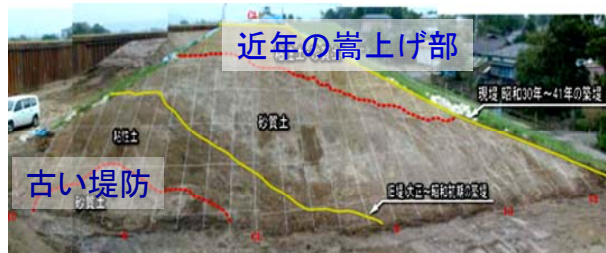
- 局所的かつ微小な不均質構造とその拡がりに堤防システム全体の安全性が依存



外見は同様でも中身は・・・

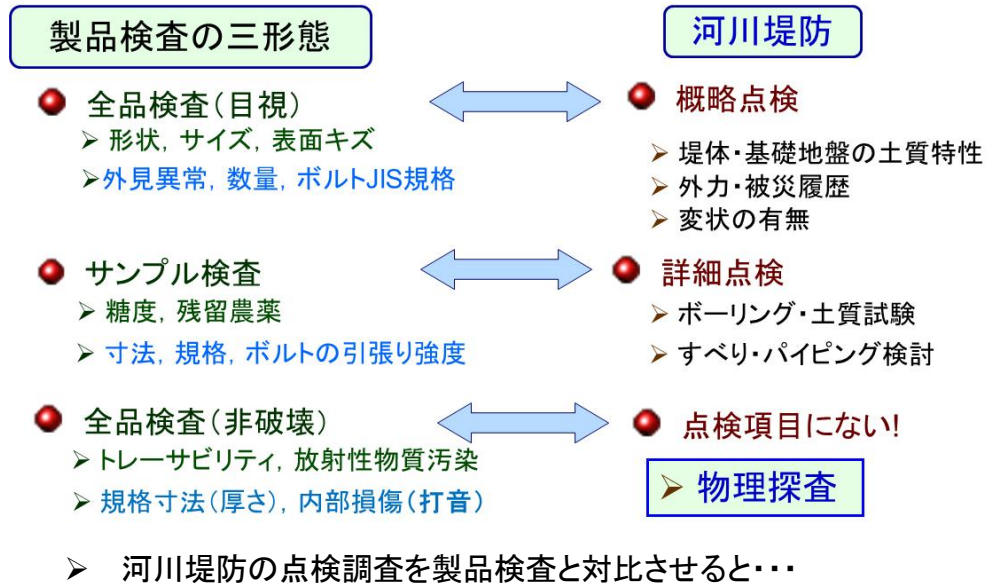


基礎地盤も変化



内部は極めて不均質

1.2 「安全」検査の視点



設問

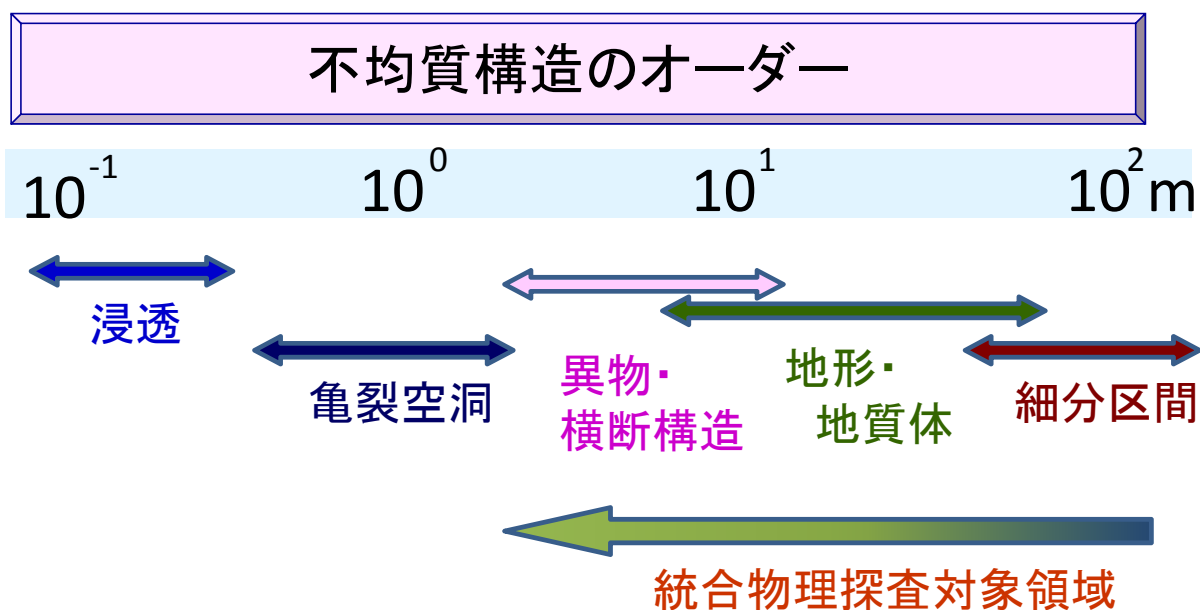
- Q1: テレビ視聴率調査, 投票行動調査(出口調査)として適当な検査法は?
- Q2: 自家用車のメーカー別保有比率を調査するのに, 通勤時間帯の道路通行車両を調査する, ある会社の駐車場で駐車車両を調べる方法は適当か?
- Q3: 食品残留放射線量, BSE 対策として適当な検査法は?
- Q4: 団体旅行客の場合, 出入国検査・航空機搭乗時保安検査は全員でなくともよい?
- Q5: 交通事故 ER 搬送者の検査は外傷の有無とその程度を調べればよい?
- Q6: 自動車用鋼板の表面欠陥検査・肉厚検査に使われている検査法は?
- Q7: 気象観測値データに基づいて交通規制を実施しているが, 観測に経費がかかるので 200 日に 1 回測定し, その期間は一律な規制をかけることとした. 適当か?
- Q8: これまで液状化は洪積層や粘性土層では発生が確認されていない. したがって液状化判定は沖積層の砂質土層だけを対象とすればよい?

- 分布が限定的で不均質でない場合は〇〇検査が有効.
- 一つでも基準値を越える商品があると, 全品の出荷を停止となる場合は〇〇検査が不可欠.
- 対象物が不均質で, 品質を予測評価できない場合は〇〇検査をすべき.
- 対象物性の時空間変動に応じた検査の方法選択が重要.

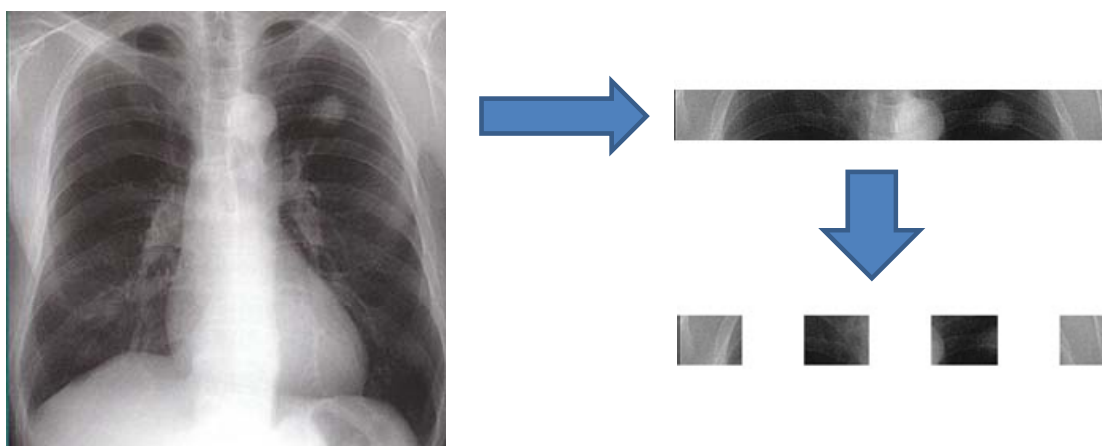


- 堤防システムの安全性に関わる「品質」は?
- 堤防劣化・損壊は確率的 or 決定論的?

1.3 不均質性のオーダーと検出の要件



- 健康診断ではレントゲンや胃透視などの「装置診断」が普通
- 統合物理探査は河川堤防に対する「装置診断」
- 連続的な空間情報が得られる唯一の方法が「物理探査」
- 当面は数m程度の「異常」が対象
- 将来的には数cmオーダーの亀裂空洞のイメージング技術についても検討



- 全面検査だからこそ「異常部」の抽出が容易
- 一次元調査(ボーリング), 離散的調査(標準貫入試験)では異常部の抽出は至難

1.4 河川堤防における安全点検調査の現況と課題

1.4.1 「堤防概略点検」とは —概要—

- 点検項目は、堤防諸元（高さや幅等）、堤体・基礎地盤土質、平均動水勾配、高水位継続時間、要注意地形、築堤年次、被災履歴、対策工実施履歴等
- 「浸透」に対する相対評価を実施（絶対評価ではない）
- 以下の3点を考慮して評価

① 堤防を構成する要因

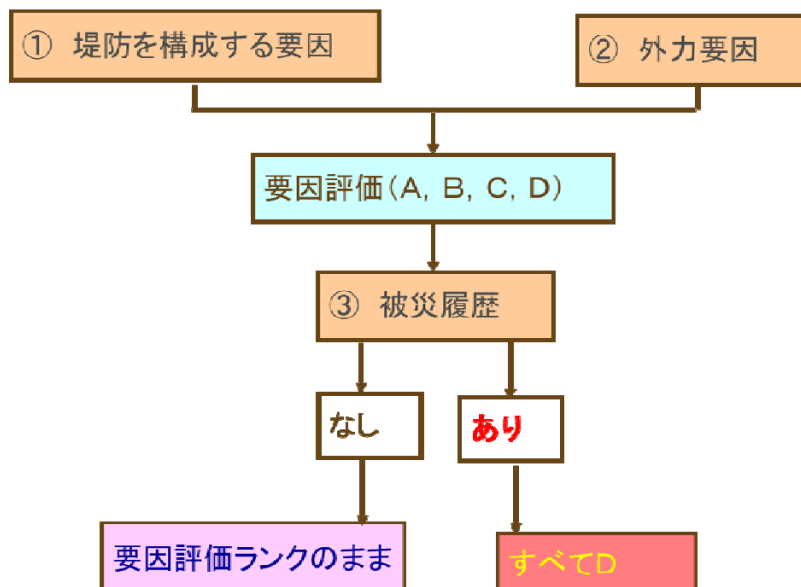
（堤体土質、基礎地盤土質、要注意地形、築堤年次）

② 外力

（平均動水勾配、高水位継続時間）

③ 被災履歴

（浸透による被災の有無）



1.4.2 「堤防詳細点検」とは —浸透に対する照査—

すべり破壊

- 非定常飽和・不飽和浸透流計算＋円弧すべり法から算出した安全率に基づく評価（初期降雨による湿潤あり）

$$F_s \geq 1.2 \times \alpha_1 \times \alpha_2 \quad (\text{裏のり})$$

α_1 : 築堤履歴係数(1.0,1.1,1.2 複雑なほど大)

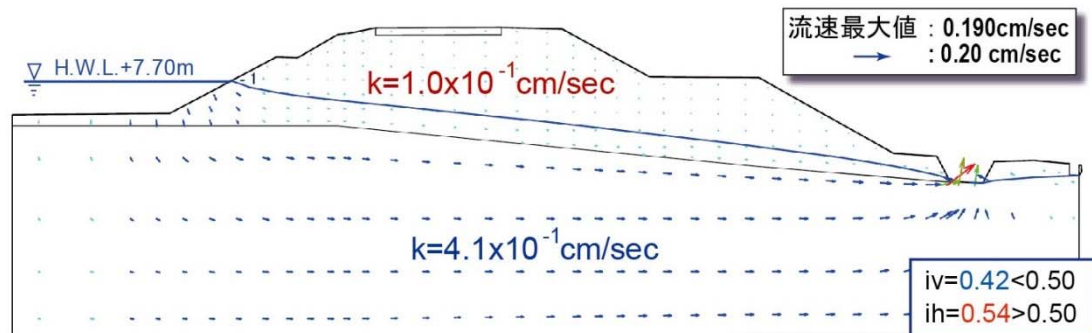
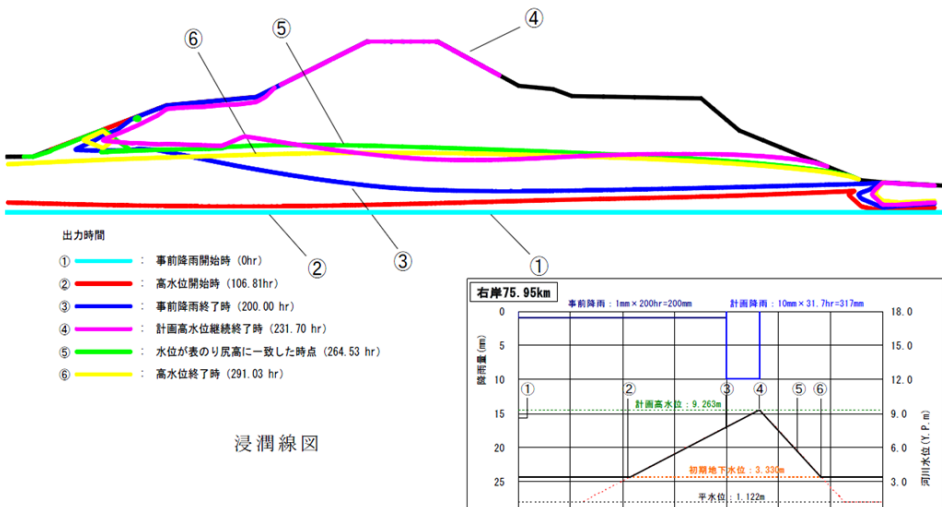
α_2 : 基礎地盤係数(1.0,1.1 要注意地形ありで大)

パイピング破壊

- 非定常飽和・不飽和浸透流計算に基づく評価（初期降雨による湿潤あり）

$$i < 0.5 \quad (\text{被覆土なしの場合})$$

$$G/W > 1.0 \quad (\text{被覆土ありの場合})$$

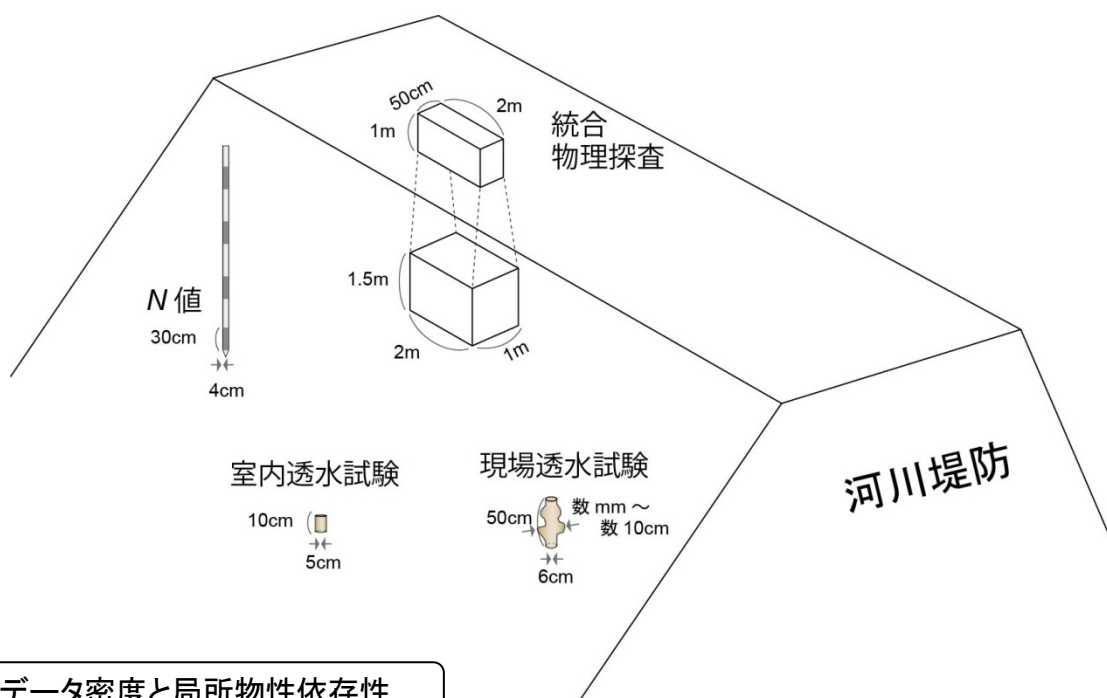


計画高水位継続時（検討時間：306時間）の浸潤面

1.4.3 概略点検・詳細点検を巡る問題点 — 概括 —

- 堤体内部構造・基礎地盤構造把握不十分
 - 土質ボーリングデータ依存 → 1D, しかも疎
 - 治水地形分類図 → 河川堆積学的検討不十分
 - 被災履歴重視 → 地歴情報収集解析不十分
- 詳細点検の問題
 - 堤体・地盤モデル化

安全判定と矛盾する被害の発生



データ密度と局所物性依存性

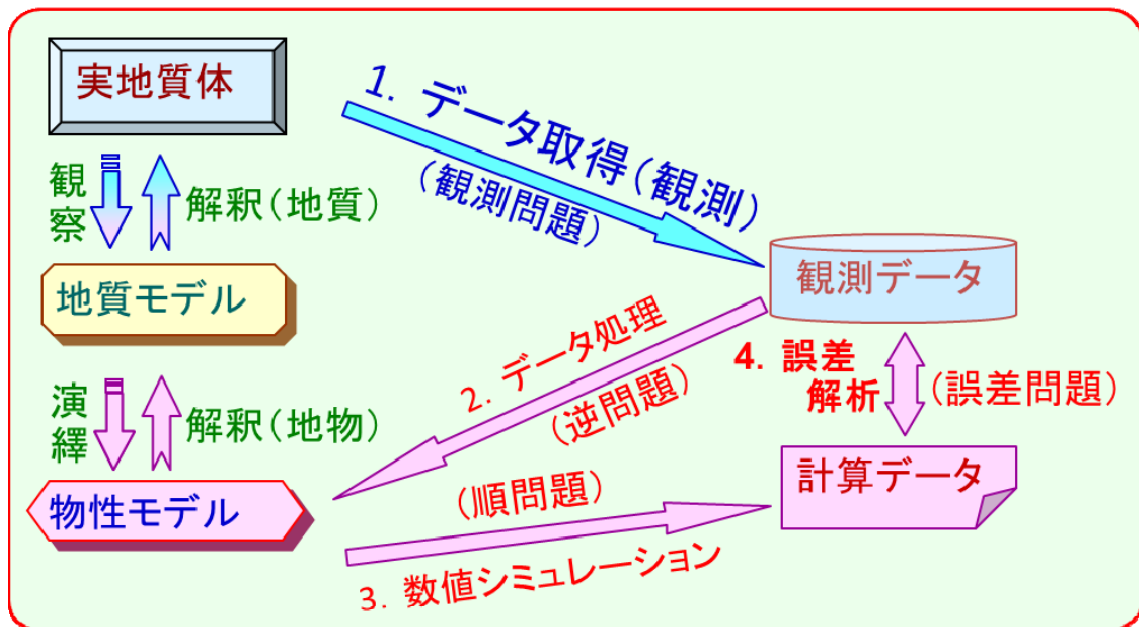
- N値が計測している物性は、深度方向に1m間隔、30cm×4cmφの円柱の局所的物性。1次元かつ離散的
- 室内透水試験が計測する物性は、10cm×5cmφの円柱の局所的物性。0次元かつ離散的
- 現場透水試験が計測する物性は、50cm×6cmφの円柱の周囲(難透水では数mm;高透水でも数10cmまでの領域)物性。ほぼ0次元かつ離散的
- 統合物理探査が計測している物性は、表層部で0.5×2.0×1.0m程度、深部では1.0×2.0×1.5m程度の直方体の平均的物性。2次元かつ連続的

2. 統合物理探査とは

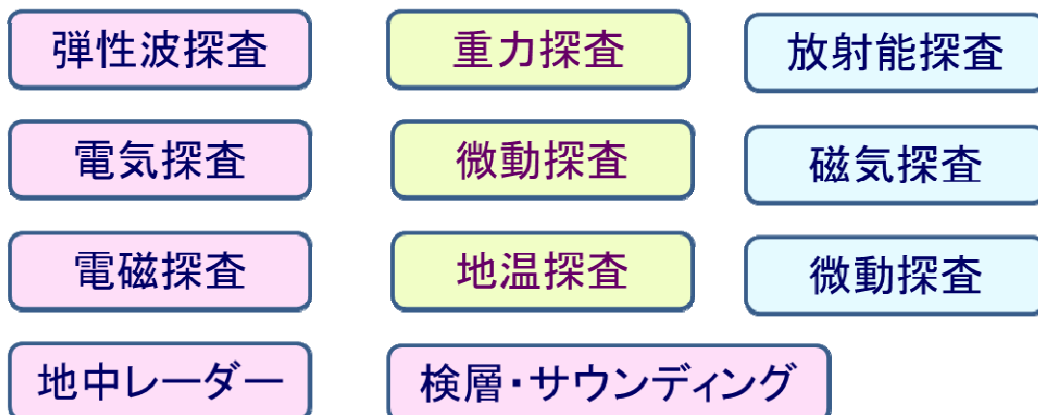
2.1 「物理探査」とは

- レントゲン, 超音波エコー, X線 CT と同様な非破壊内部構造イメージング技術

物理探査の過程と物性・地質モデル

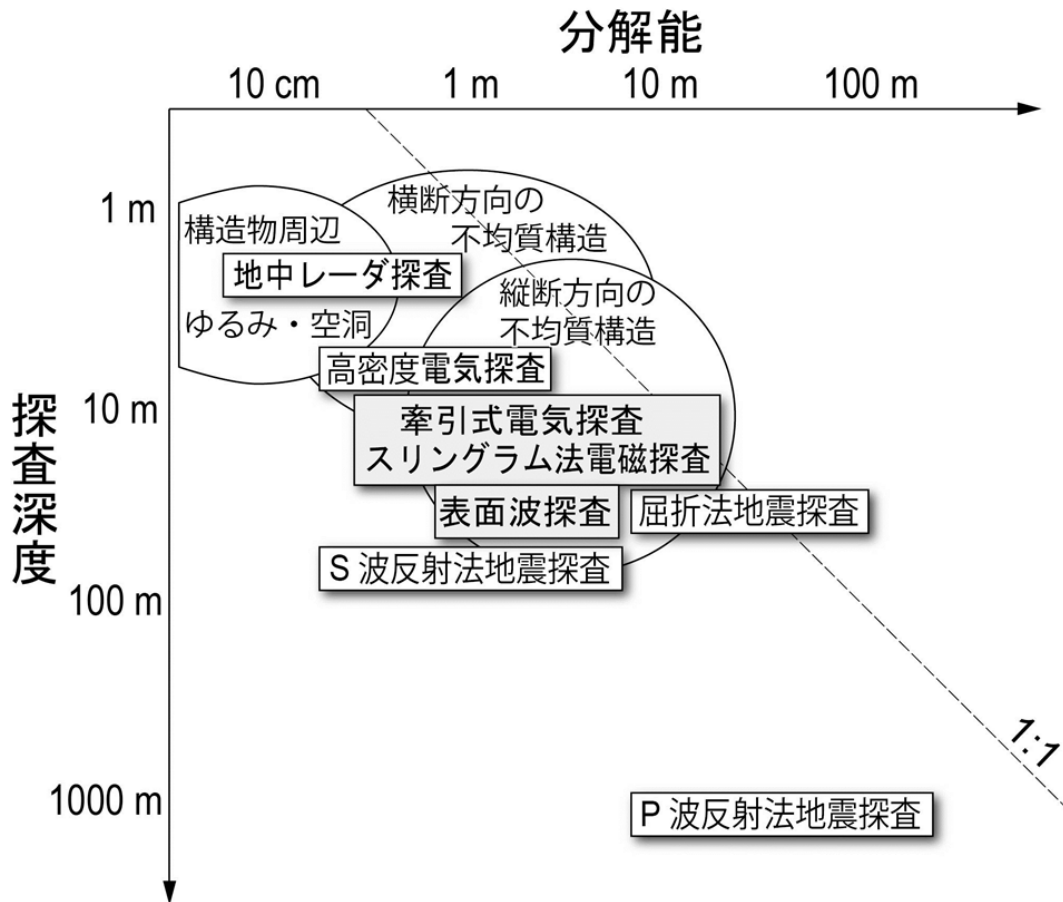


2.2 物理探査の種類



- 能動的計測と受動的計測
- 直接応答計測と間接応答(ポテンシャル)計測

2.2 物理探査の種類

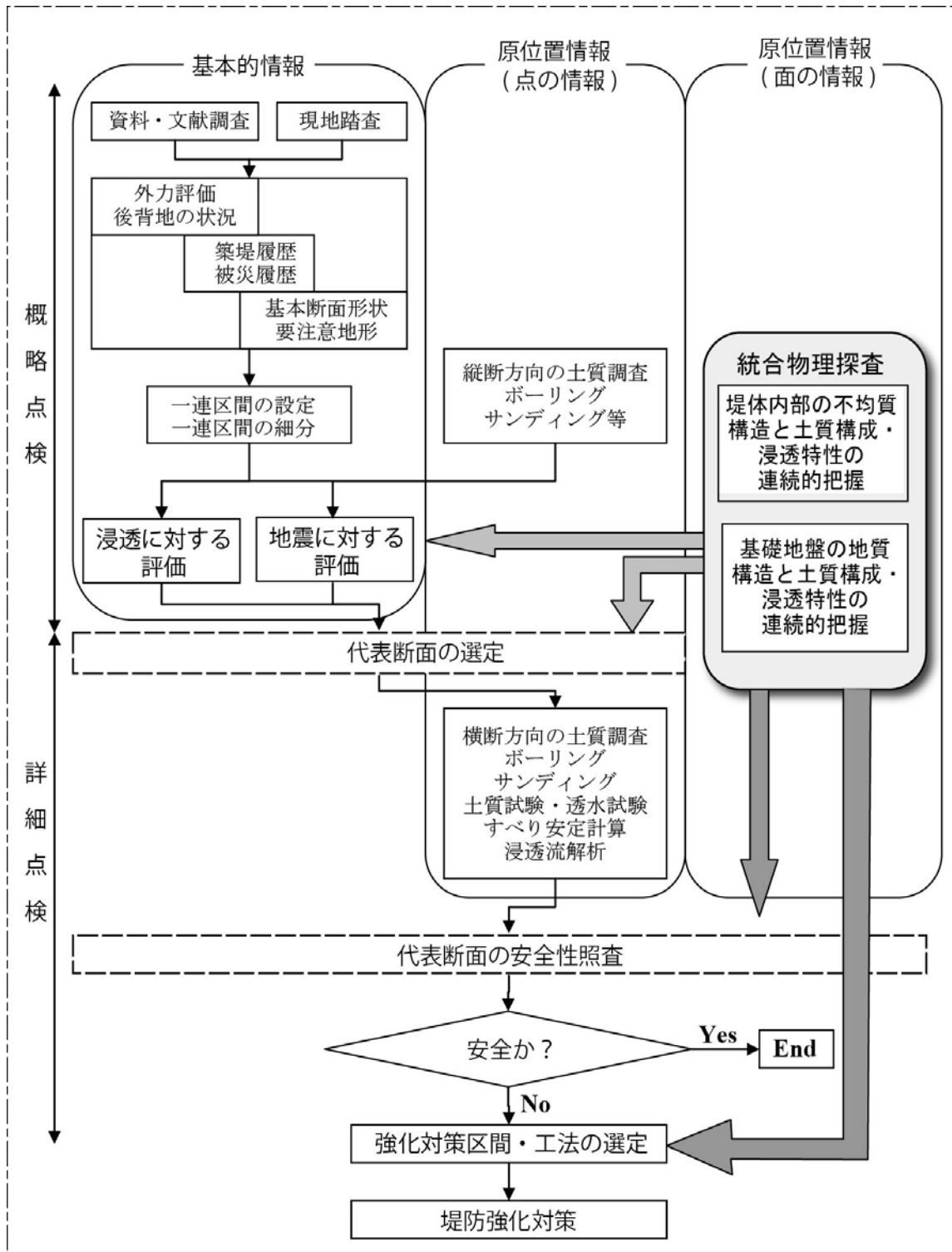


- 手法によって探査対象深度・分解能が異なるので、対象を想定して選択することが重要。

2.3 河川堤防適用物理探査の要件

- 安全性：非破壊あるいは低侵襲性の計測手法であり、堤防の安全性に影響しないこと。
- 経済性：低コストで連続的な堤防内部情報を提供できること（凡そ¥100万/km程度）。
- 作業性：現地計測作業、計測機器操作が容易で、データ解析処理も簡便であること。
- 探査深度：堤防内部から基礎地盤まで、深さ数m～20mの領域を把握できること。
- 異常部検出能：相対的異常区間(数10m程度)を検出できること。
- 有用性：堤防の危険度評価に必要な物性情報(特にVs, 比抵抗)を提供できること。
- 非独占性：普及の前提として技術的ノウハウが開示されており、かつ機器利用が可能であること。

2.4 河川堤防調査における物理探査の位置づけ



- 「点の情報」では抽出困難な異常部の抽出を「面の調査」として全域的に実施可能な唯一の非破壊・経済的原位置探査法

2.5 「統合」の意義と目的

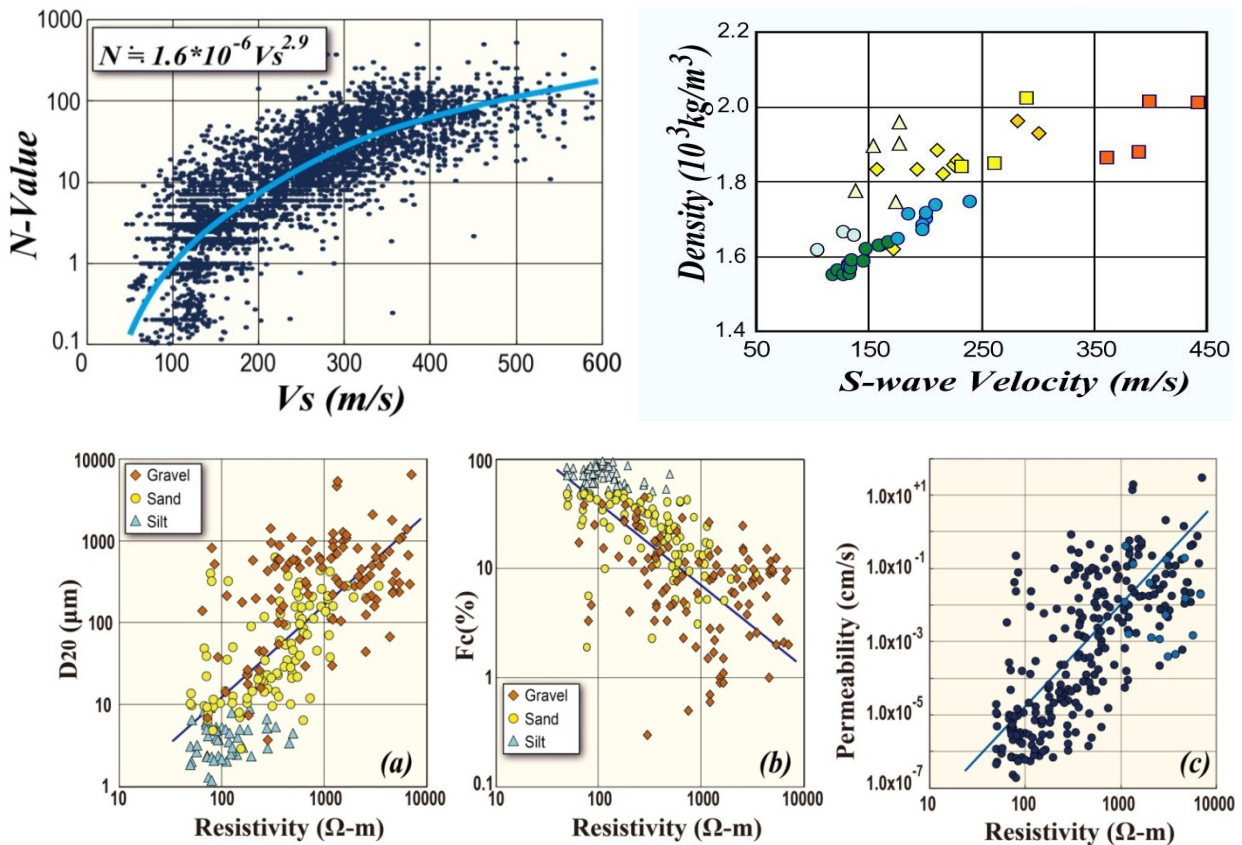
2.5.1 「統合」: ジョイント・インバージョンの考え方

- 確率的な相関を有するいくつかの計測物性データと評価物性データを複数セット用いることで評価物性の推定確度の向上を図る方法。
- 計測物性は時空間的・非破壊で計測できる物性値(弾性波速度(V_p , V_s), 比抵抗, 重力, 温度, 電磁波応答など)が選択される。
- 評価物性はアクセスが困難で, かつ測定自体も難しい地中の物理量(透水係数, 空隙率, 含水率, 石油・ガス含有量)が対象となる。



- 堤防システムの場合, 高密度かつ低コストで取得可能な S 波速度値と比抵抗値を計測し, 堤防システムの対浸透機能(透水係数), のりすべり安全性, 耐震性(液状化, 滑動)を評価する。
- 「統合物理探査」では最も簡易なジョイント・インバージョン手法の一つである, 「クロスプロット解析」を採用している。

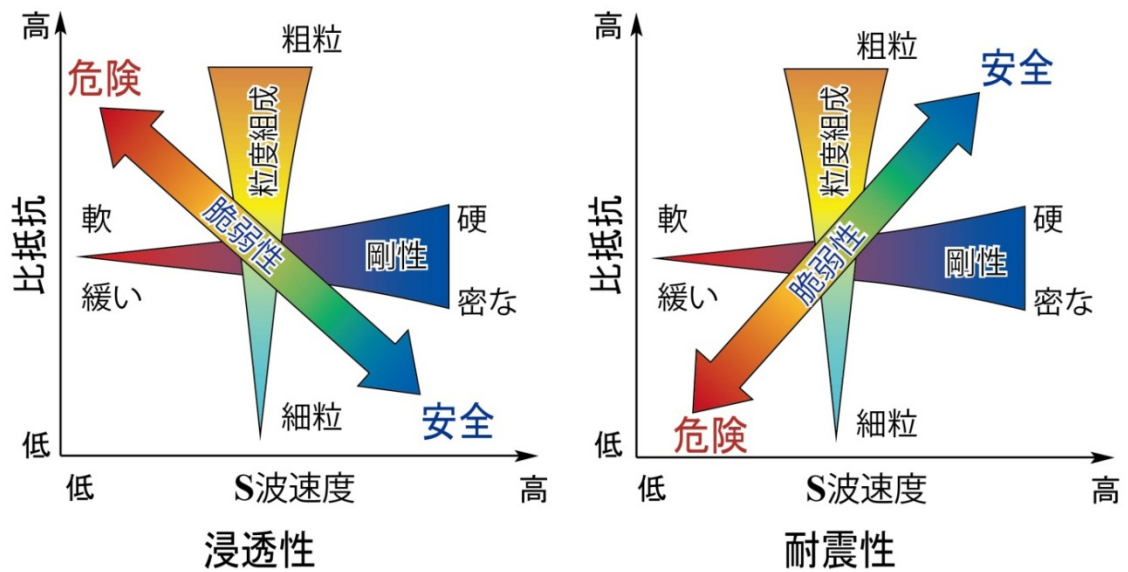
2.5.2 クロスプロット解析の概要



- S 波速度と N 値, 比抵抗と透水係数には, 上の図に示すような相関が認められてお

り、前者から後者を推定することができる。

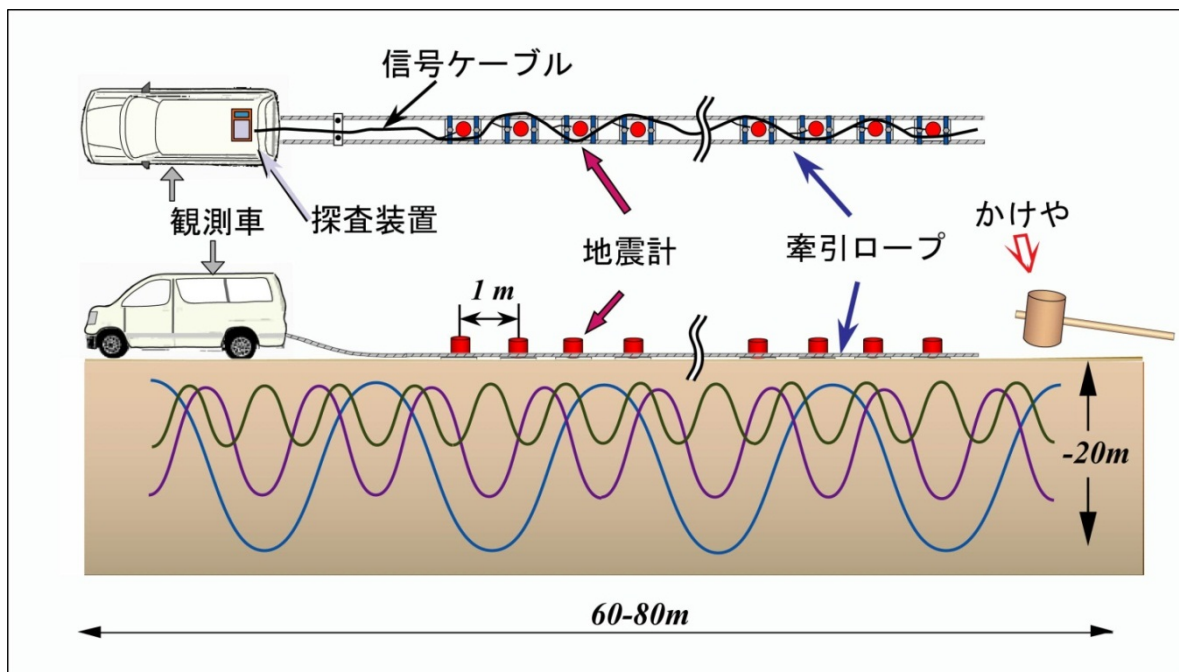
■ S波速度と比抵抗による脆弱性評価マップ



- 粗粒（≒高比抵抗）で緩い（≒低 S 波速度）材料は浸透・液状化の危険度が高い
- 細粒（≒低比抵抗）で緩い（≒低 S 波速度）材料は地震時変形の危険度が高い

2.6 統合物理探査の構成手法

2.6.1 表面波探査

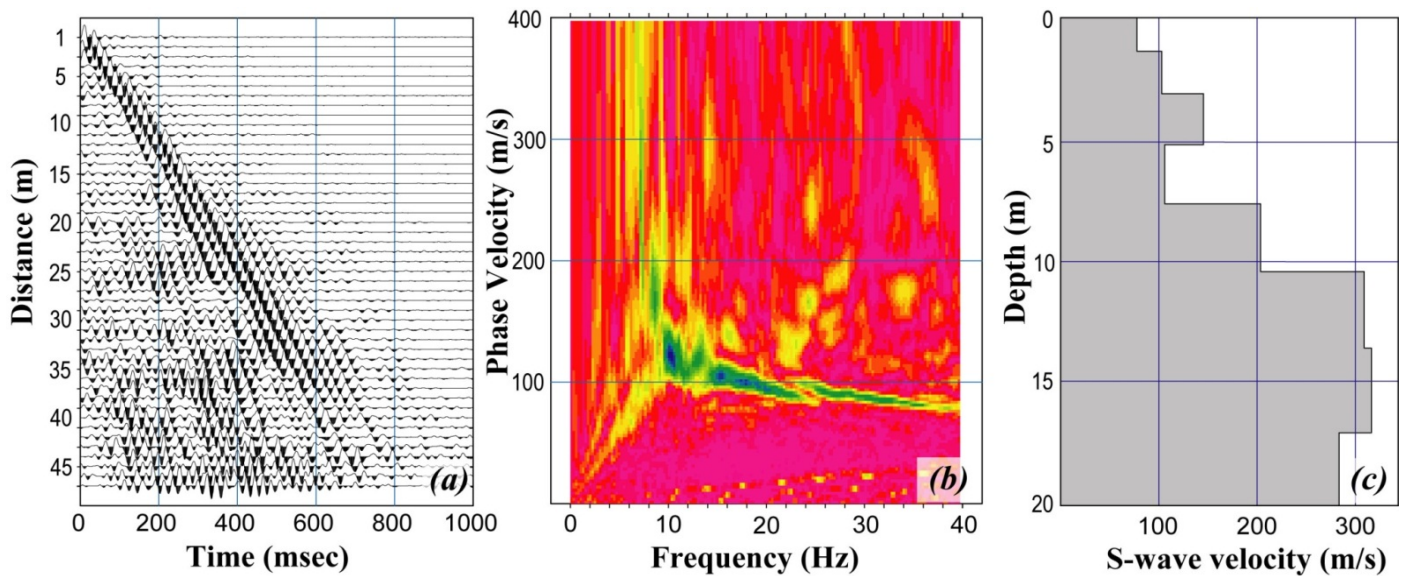


- 波長によって伝播する深さが異なり、速度も異なるという表面波の分散特性に基づいて地下のS波速度構造を推定する手法



- ランドストリーマーを順次移動させ、かけ矢起振振動を受振

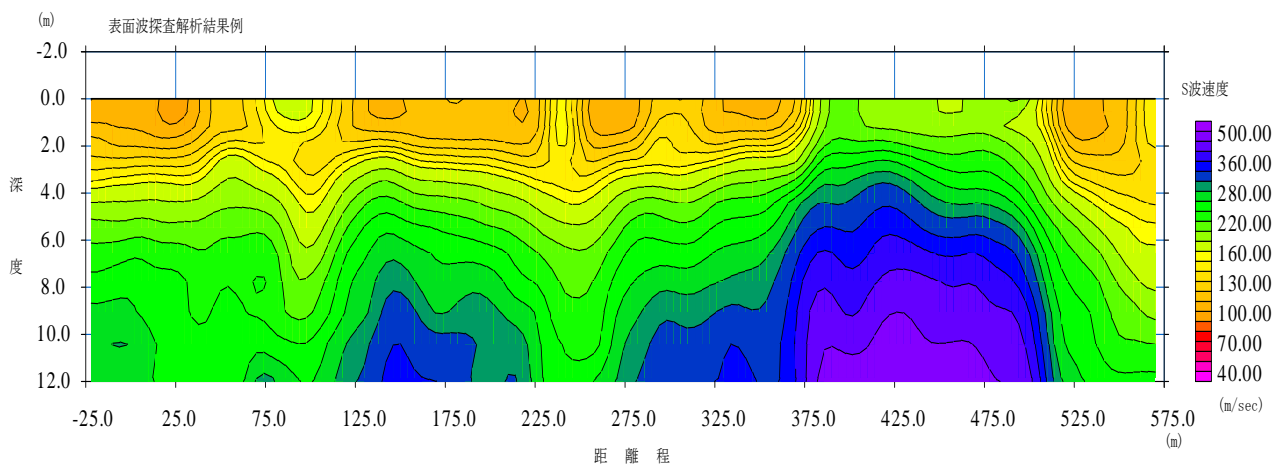
2.6.1 表面波探査



測定データ

波形変換過程

S 波速度構造

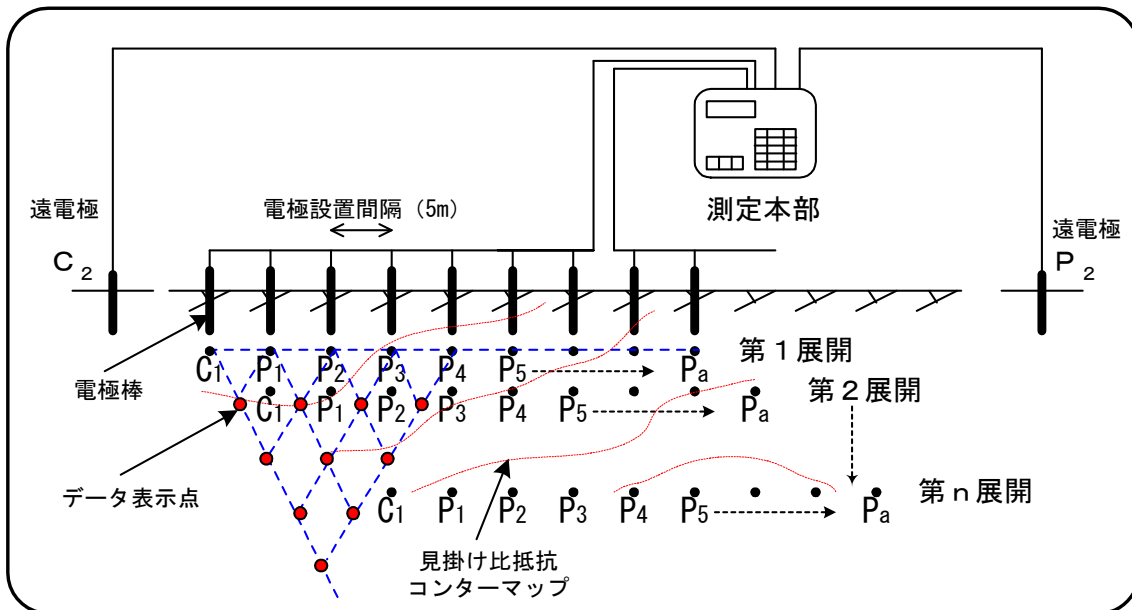
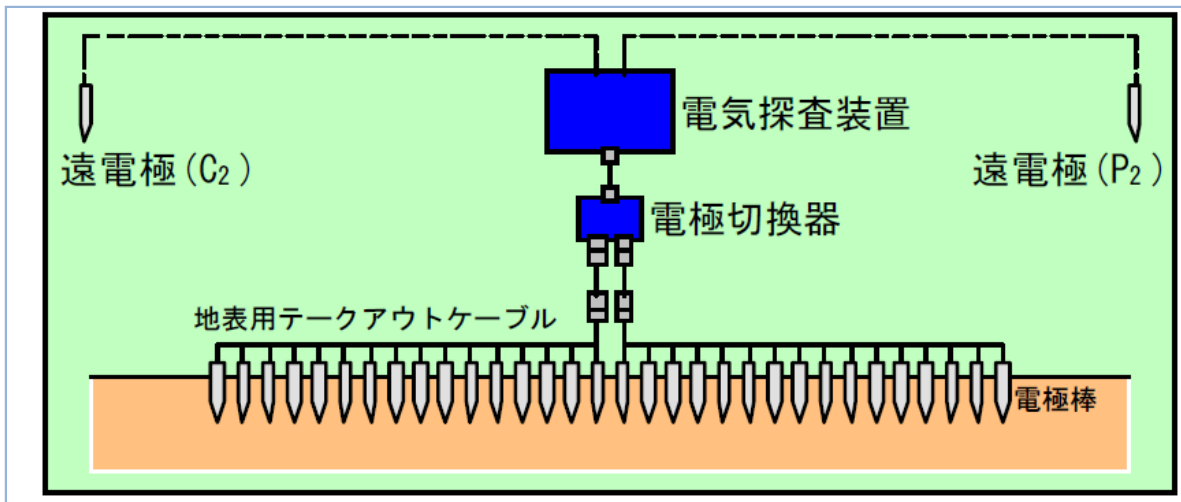


2次元 S 波速度構造断面

■ 1D の S 波速度構造に対して空間的な制約条件を加えて
2D の S 波速度構造断面を作成

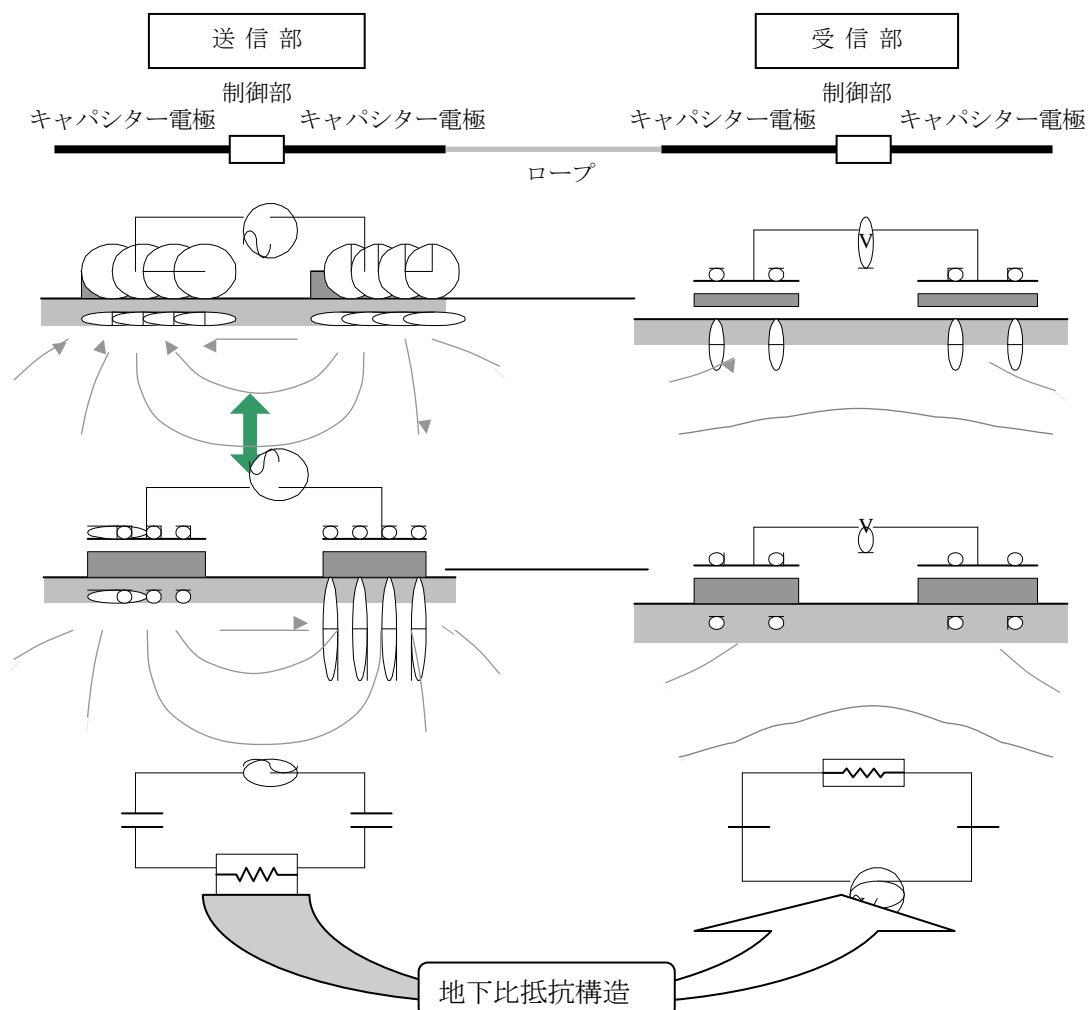
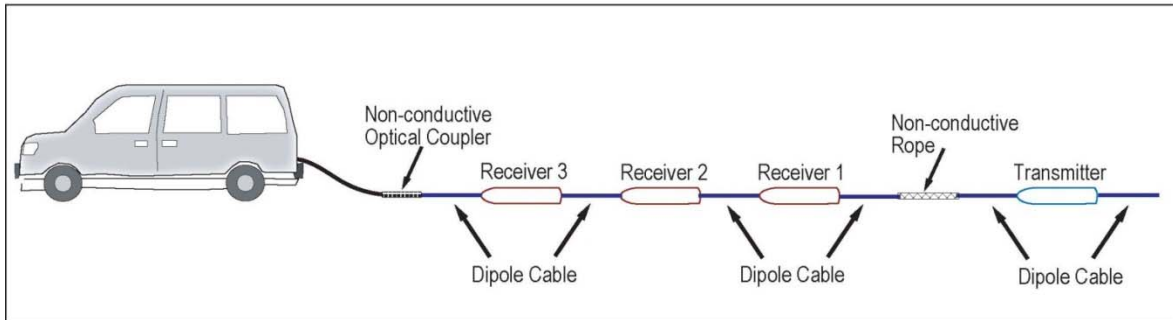
2.6.2 牽引式電気探査

従来の「直流電気探査」では...



■ 予め地面に多数の電極を打ち込み、結線して探査装置まで配線する現場作業に手間がかかった。

2.6.2 牽引式電気探査



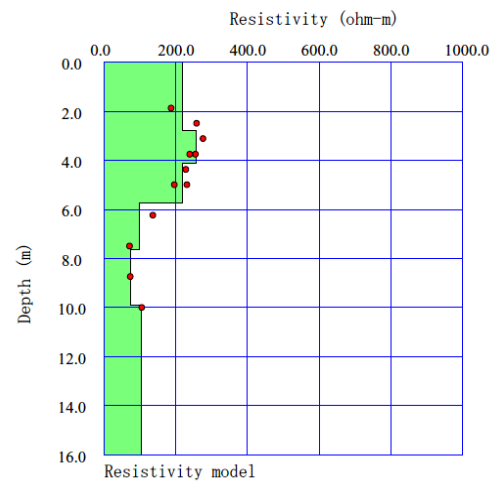
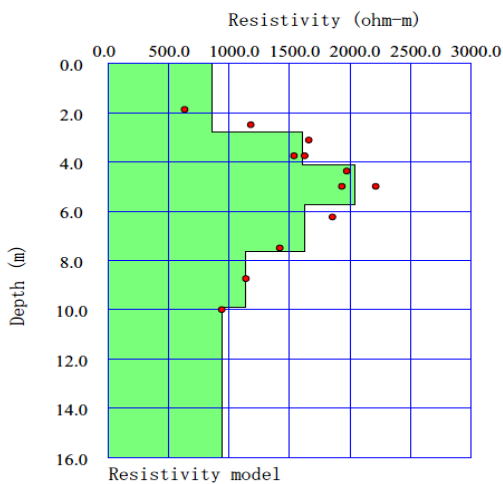
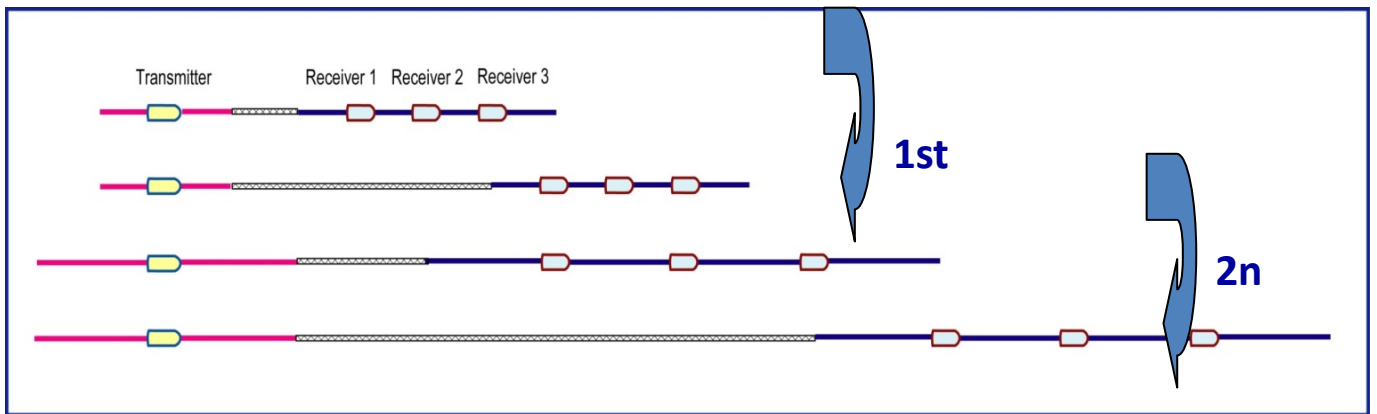
牽引式電気探査でのキャパシター電極と回路モデル

送信部の2つのキャパシター電極に逆の電荷を与えると、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。これにより受振部側付近の地盤にも電流が流れるので、受信部のキャパシター電極と地盤の間にもコンデンサーが形成され、受振部の2つの電極間に電位差が発生する。この電位差から比抵抗分布を求める。

2.6.2 牽引式電気探査



■ ツールを組み立て、車両あるいは人力で牽引してデータを取得する。

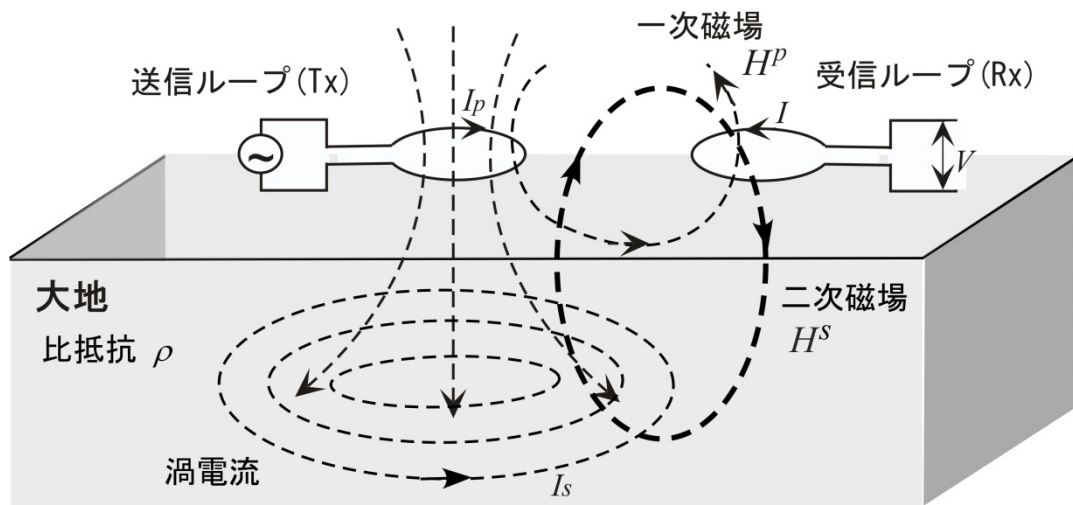


$D=250$

$D=380$ 16

■ 電極間隔を変え数往復して多深度データを取得解析する。

2.6.3 スリングラム法電磁探査



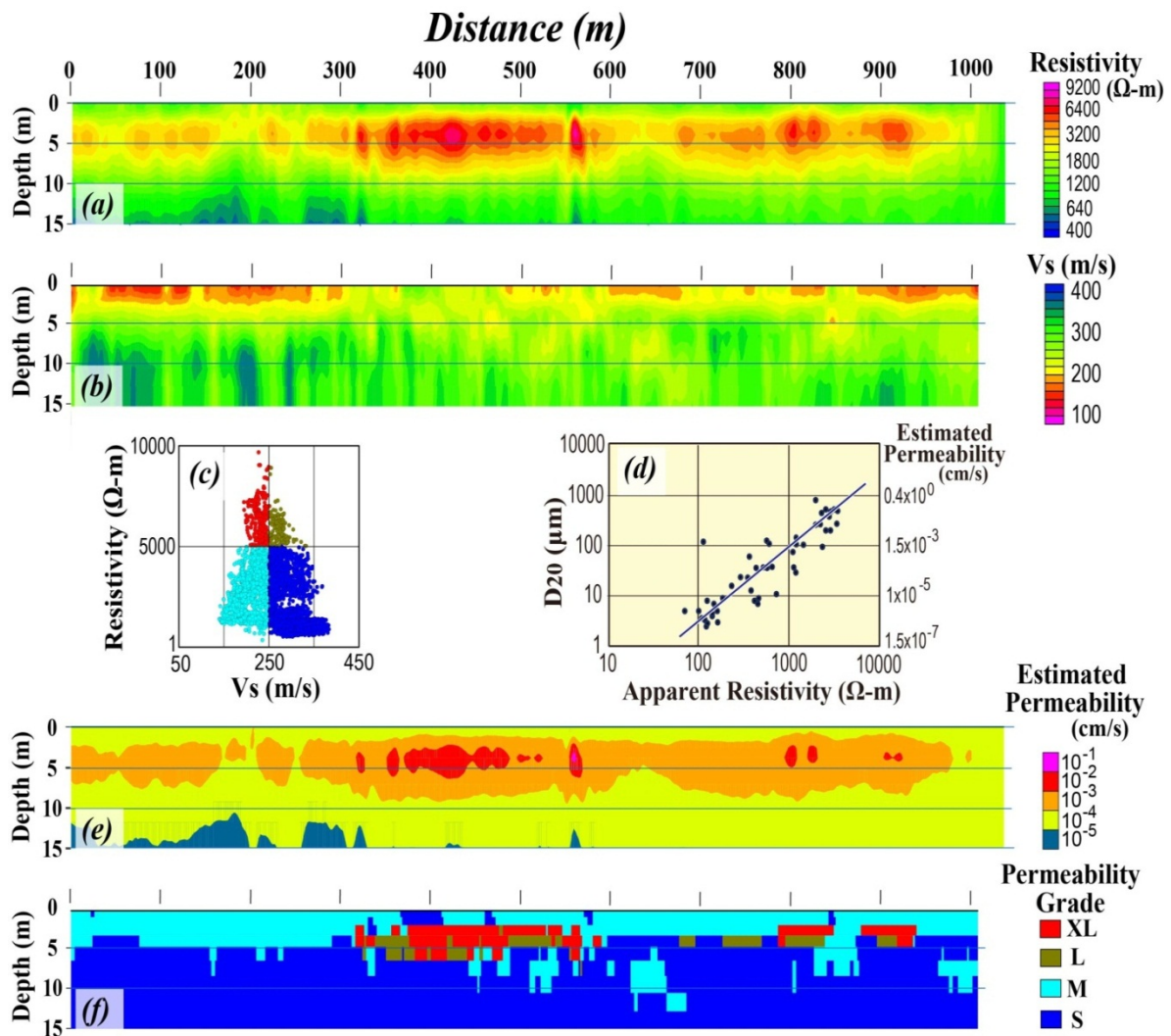
■ 送信コイルで交流磁場を発生させると地中に誘導電流が流れる。これにより新たに発生した2次磁場の大きさが地盤の導電率の関数となることを利用。



■ 人肩懸架移動あるいはそり牽引方式で測定



2.7 統合物理探査による弱点箇所抽出・評価の流れ



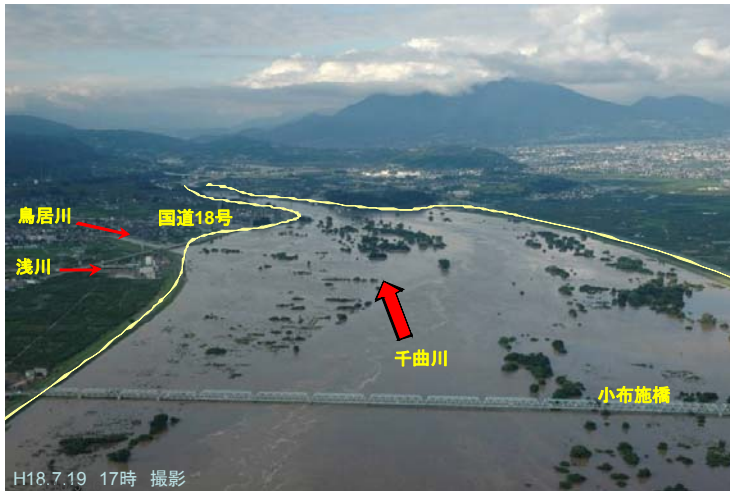
- 測定データを解析して S 波速度構造(b)と比抵抗構造(a)を描画
- S 波速度と比抵抗との関係をクロスプロット図で解析(c)
- S 波速度, 比抵抗と物性値(浸透特性等)との関係の検討(d)
- 物性分布図の描画(e)
- 安全評価断面図の作成解析(f)

3. 統合物理探査の適用事例

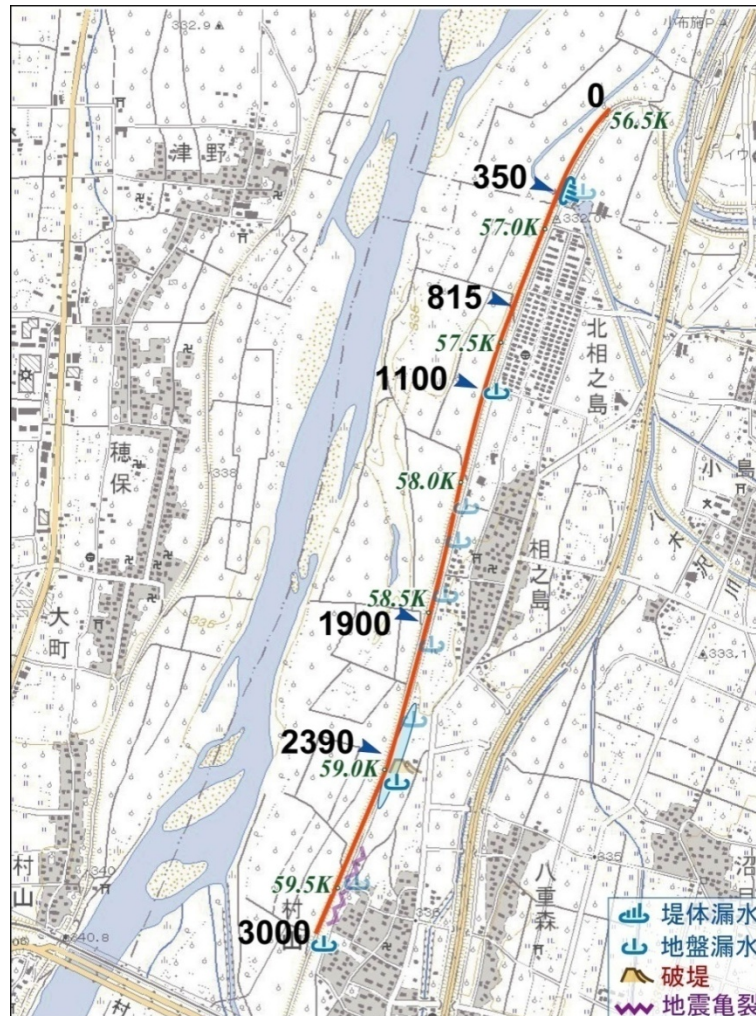
3.1 浸透被災堤防調査事例

3.1.1 出水被害の概要

立ヶ花狭窄部（H18.7豪雨の出水状況）



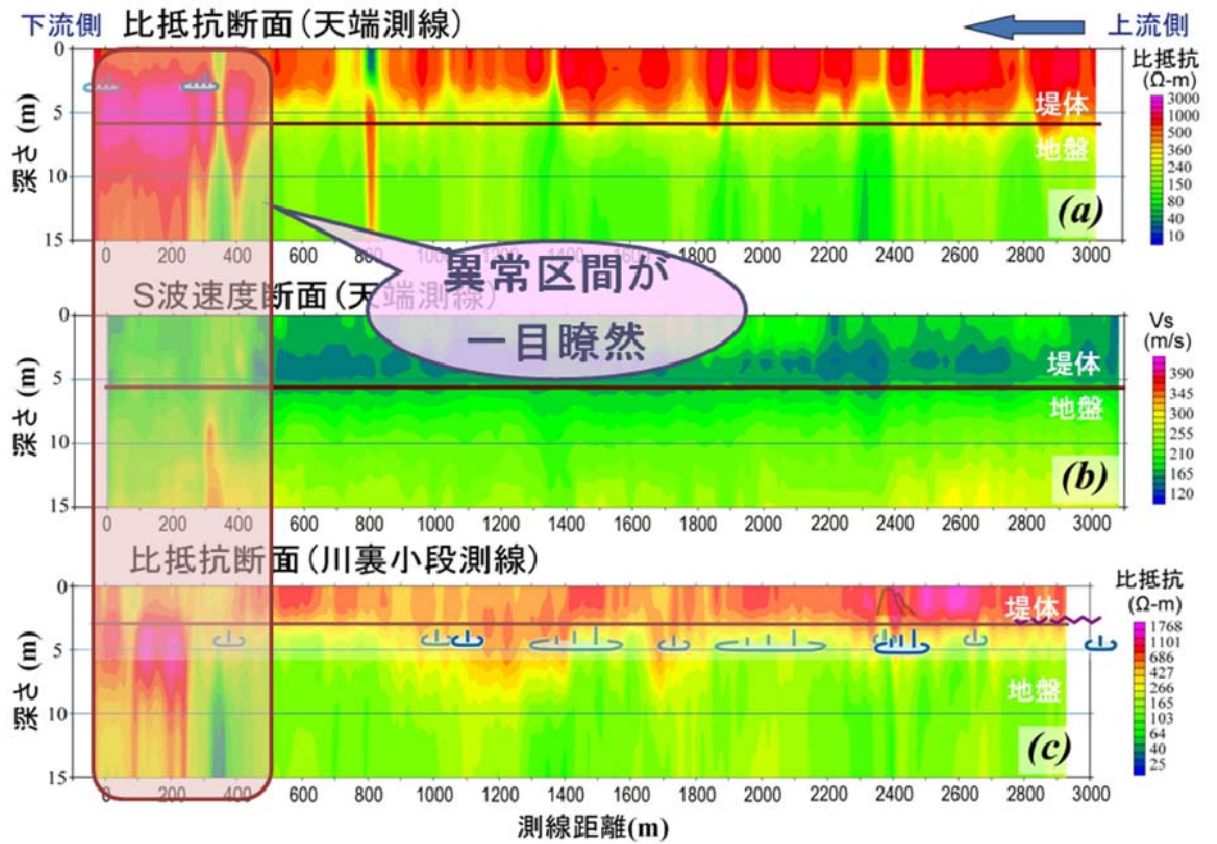
3.1.2 現地での統合物理探査実施概要



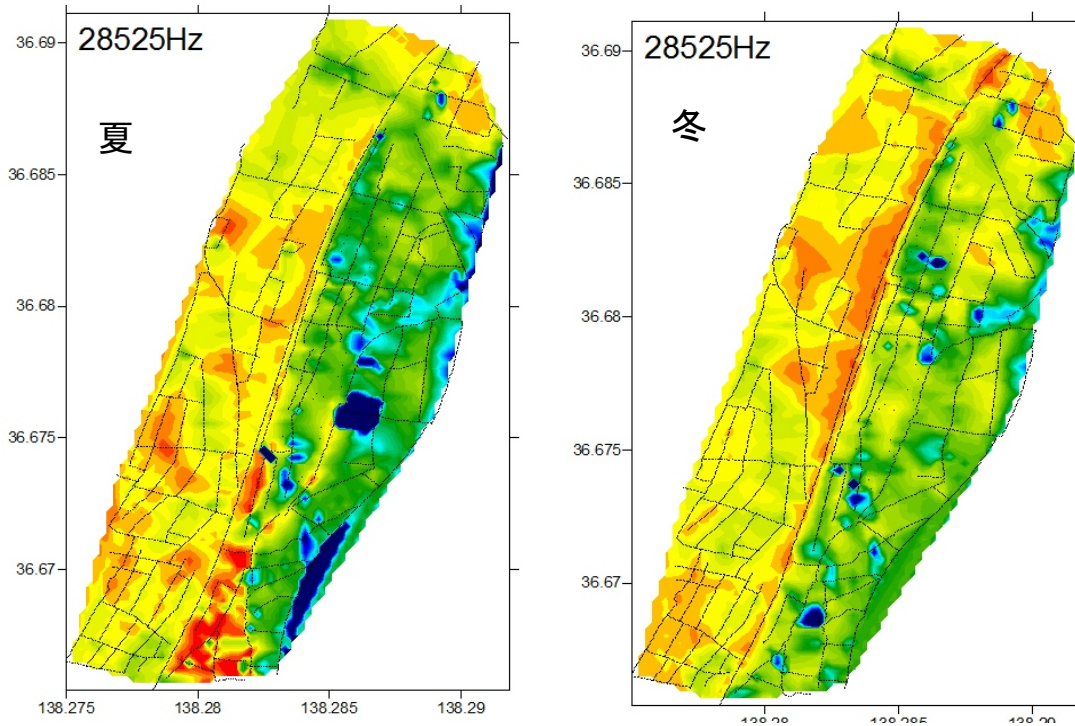
- 堤防天端と川裏小段でランドストリーマー表面波探査および牽引式電気探査実施
- 測定区間長: 約 3km
- 地元シルバー人材センターから作業補助者派遣



3.1.3 探査結果(堤防縦断)

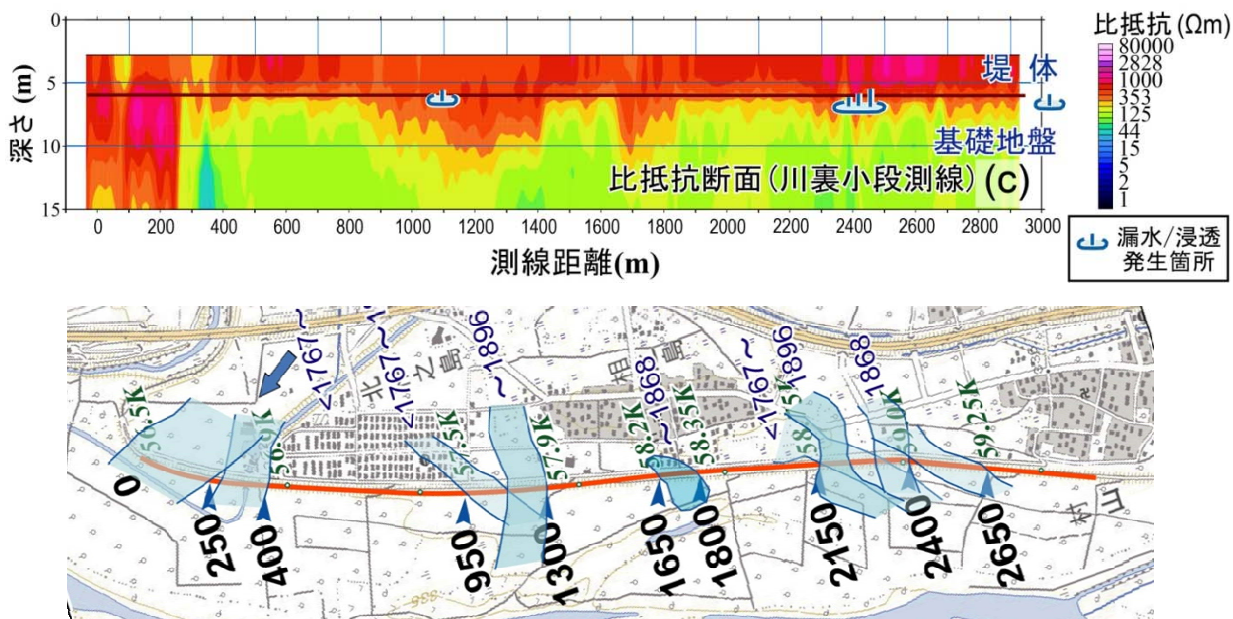


3.1.4 探査結果(堤防周辺)



- スリングラム電磁探査で堤防周辺地域の比抵抗を夏冬に測定
- 灌がい期の夏場は堤内地側の地盤比抵抗が低い。
- 地盤内の水みちが低比抵抗帯として捉えられている。

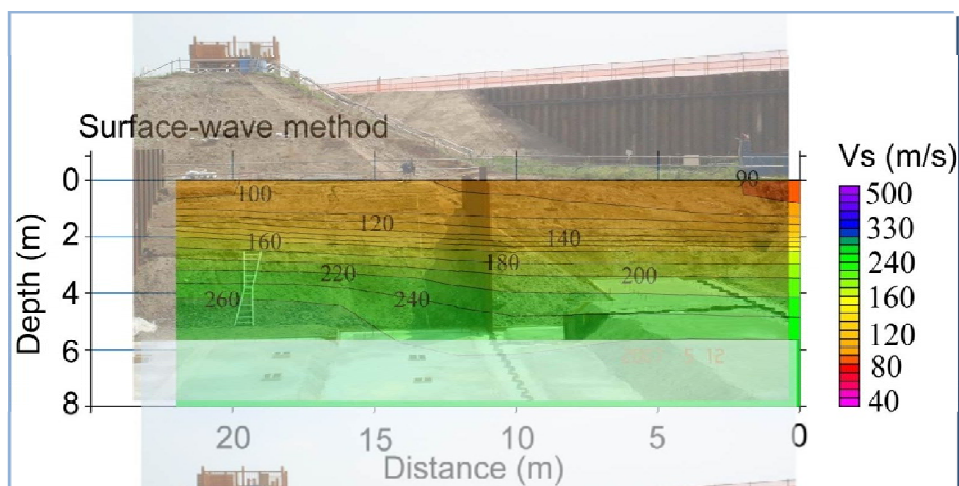
3.1.5 探査結果(基礎地盤の構造)



- 飽和しているはずの基礎地盤部に 1000Ωm を越す高比抵抗異常部が数箇所 でイメージングされた. そのうち 2 箇所は最近の漏水箇所と一致した.
- 他の区間も過去(江戸時代)の洪水流路と整合的であった.

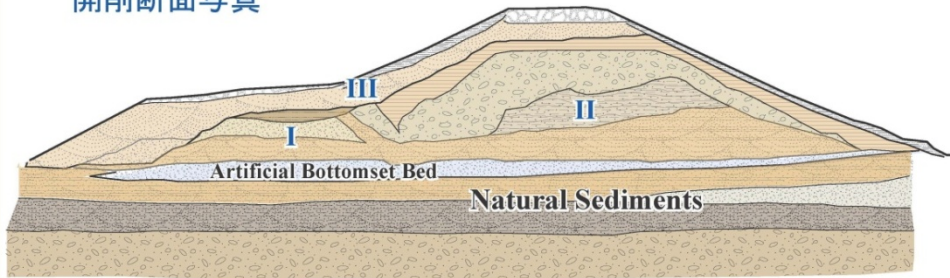
3.1.6 探査結果(堤体の内部構造)

- 堤防開削現場において開削前に統合物理探査を実施し, 開削後に堤体内部・基礎地盤物性構造を観察・測定して統合物理探査 の特性について検証する.
- 堤防開削現場において物理探査を実施し, 何がどのような物性構造として 捉えられるかを検証する.

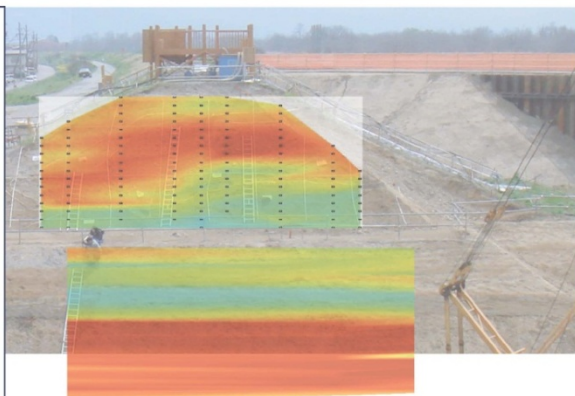
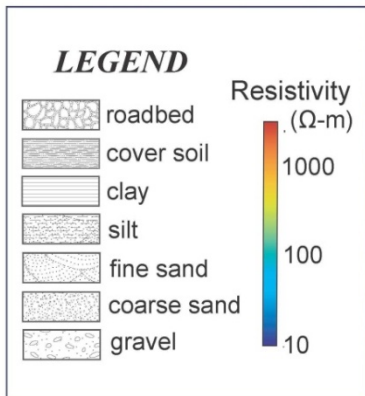




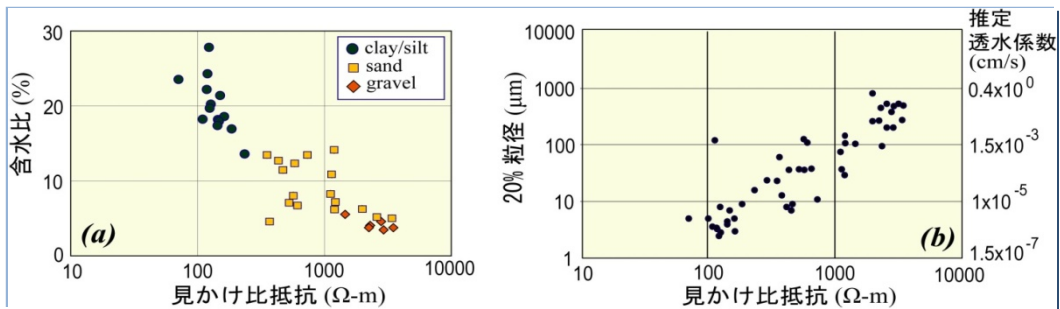
開削断面写真



開削断面層相解釈



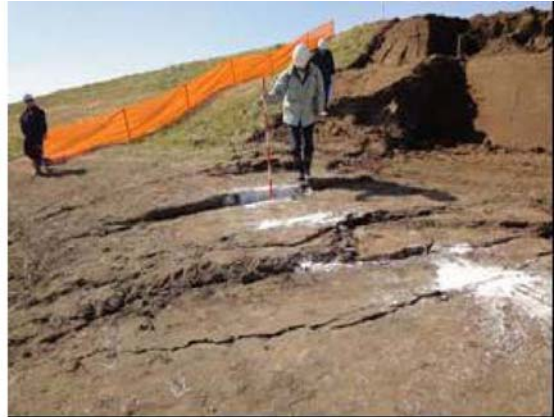
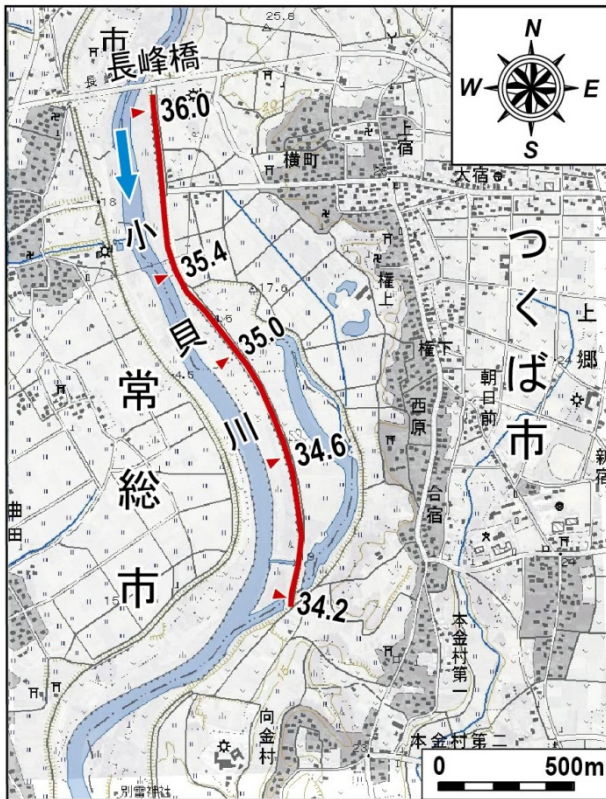
開削断面比抵抗マップ



- 堤体開削面で比抵抗値を多点で測定し、比抵抗分布(マップ)を作成すると...
- 比抵抗が土質分布をよく反映していることがわかる.
- そこで開削面から試料を採取し、粒径・含水比を測定してみると...
- 比抵抗と高い相関が見出された.

3.2 地震被災堤防調査事例

3.2.1 地震被害の概要

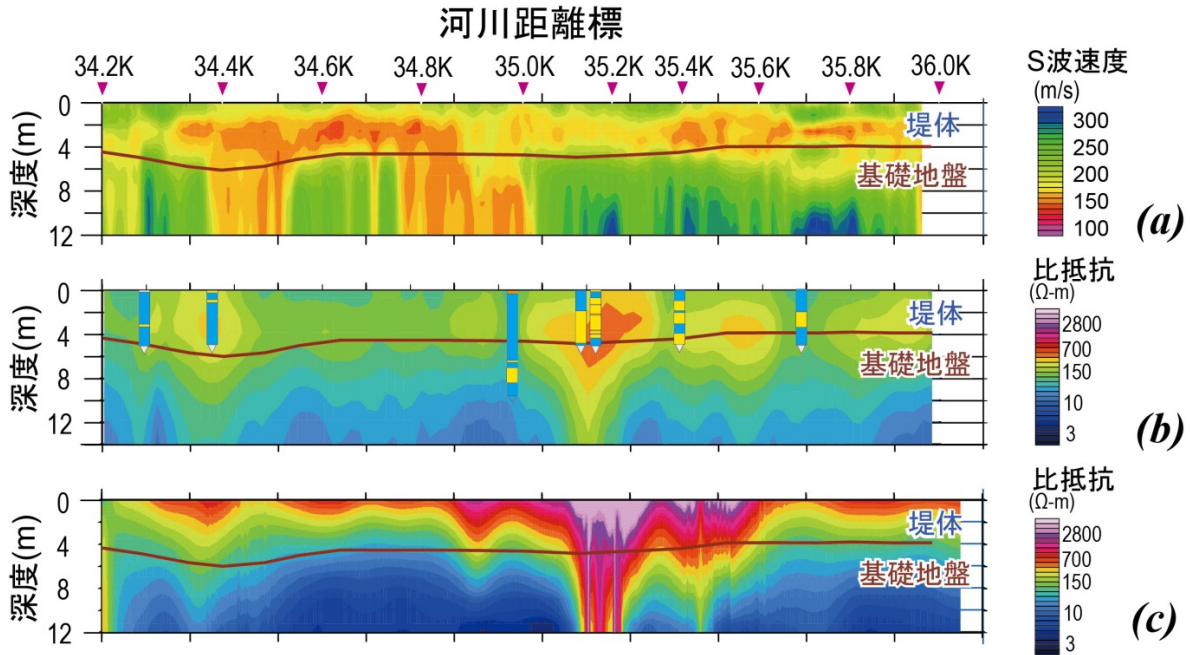


- 被災は川表のり肩から堤内地にかけて発生.
- 川表のり面では, のり面下部に開口クラック.
- 堤防天端, 川裏側のり面で開口あるいは落差のある縦断方向のクラックが連続し, のり尻付近ではらみ出し・隆起や噴砂が認められた. 堤内地側では旧流路の池に向かって水平変位を生じている

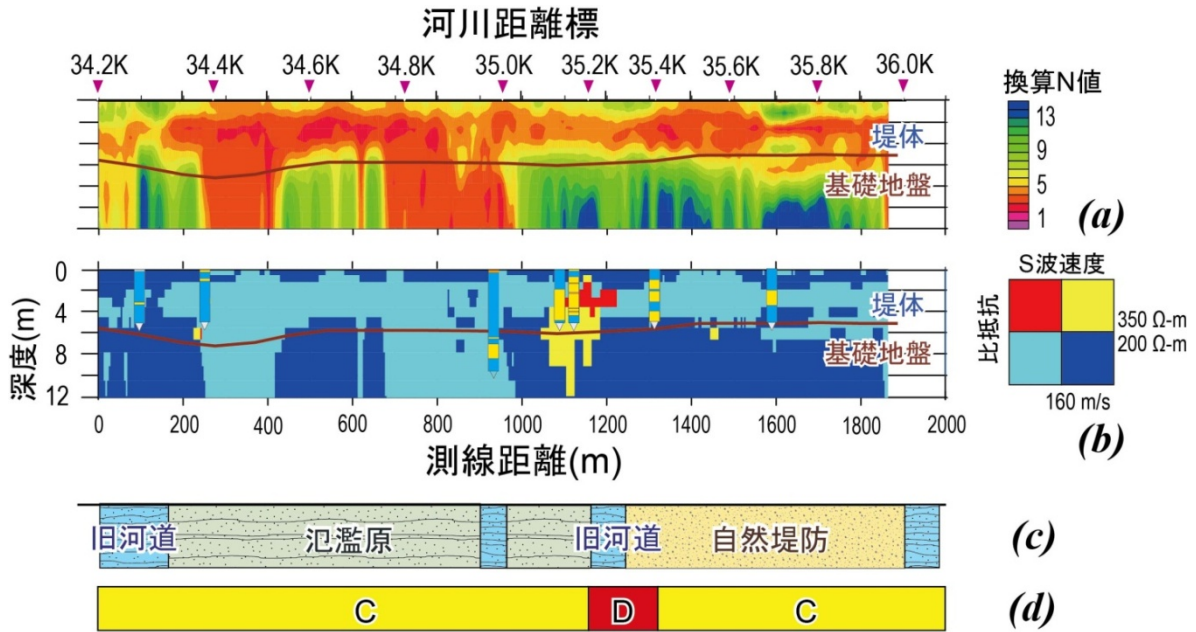


(下館河川事務所資料)

3.2.2 地震前の探査結果

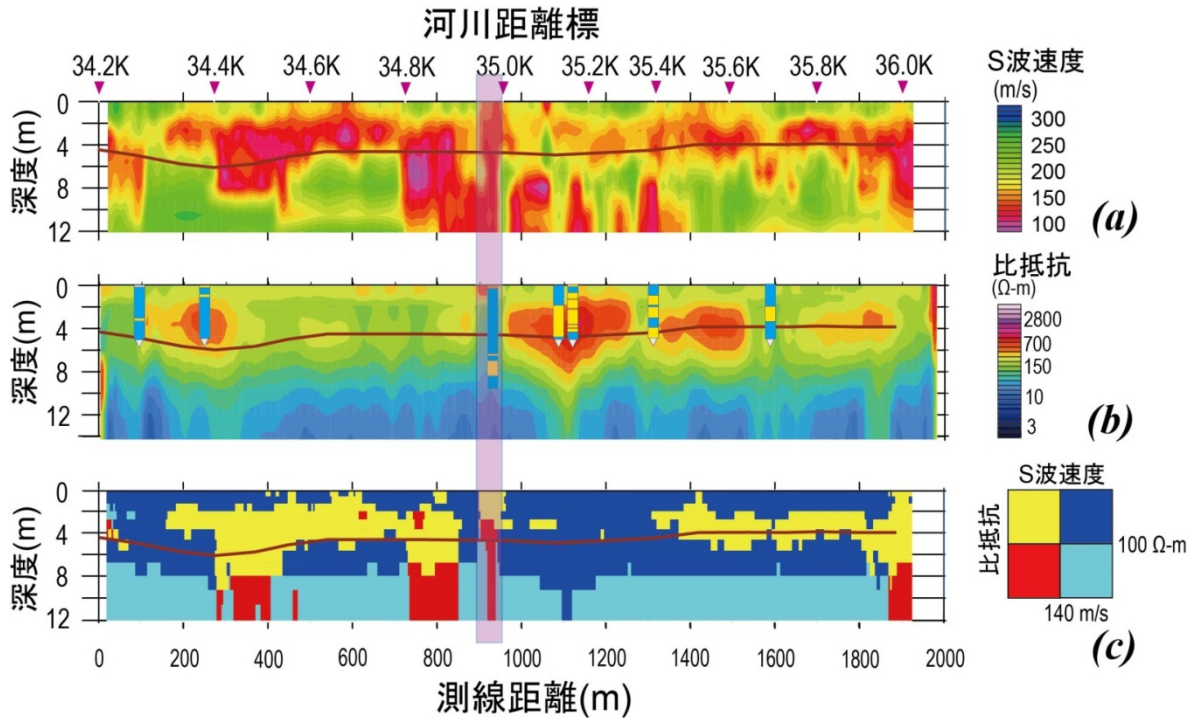


- 地震前調査は 2005 年 8 月に実施.
- (a) 表面波探査による S 波速度構造断面
- (b) 牽引式電気探査による比抵抗断面
- (c) スリングラム電磁探査による比抵抗断面
- 7 箇所堤体ボーリング土質確認

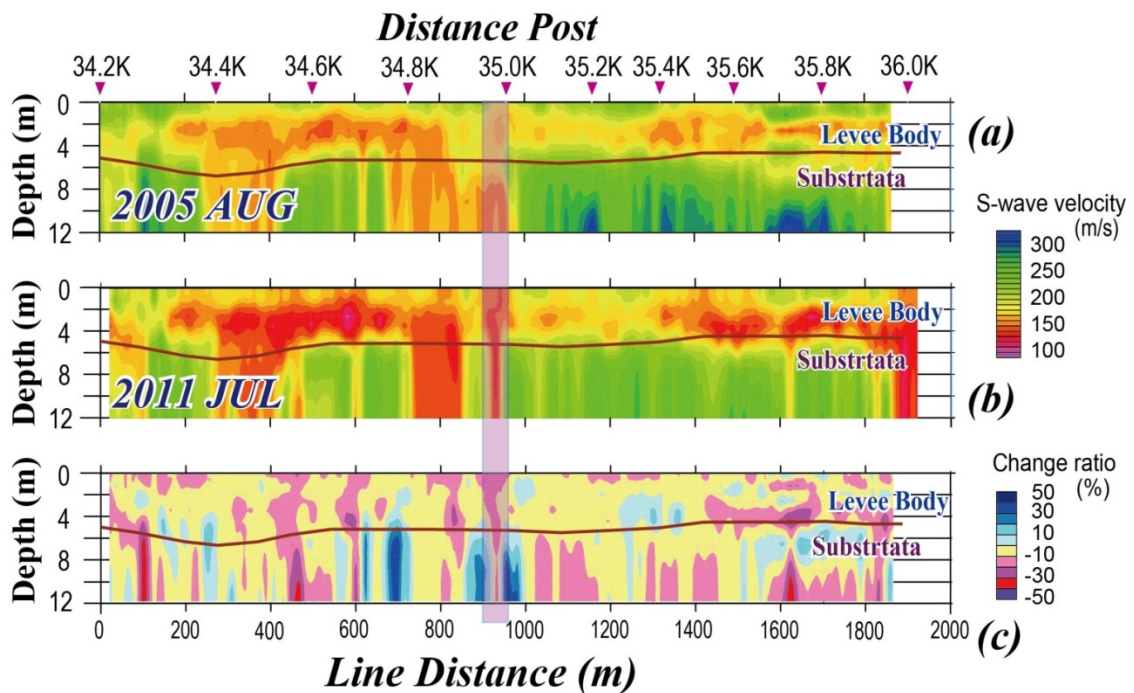


- (a) S 波速度構造~換算式で求めた N 値空間分布断面
- (b) 浸透に対する安全評価断面
- (c) 治水地形分類
- (d) 概略点検結果

3.2.2 地震後の探査結果

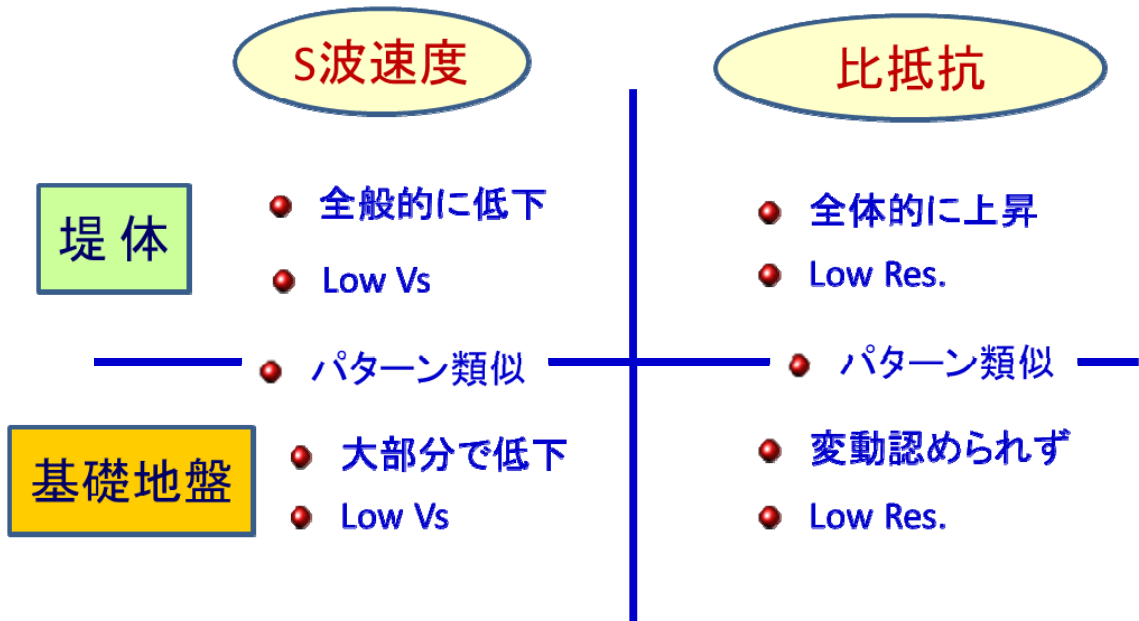
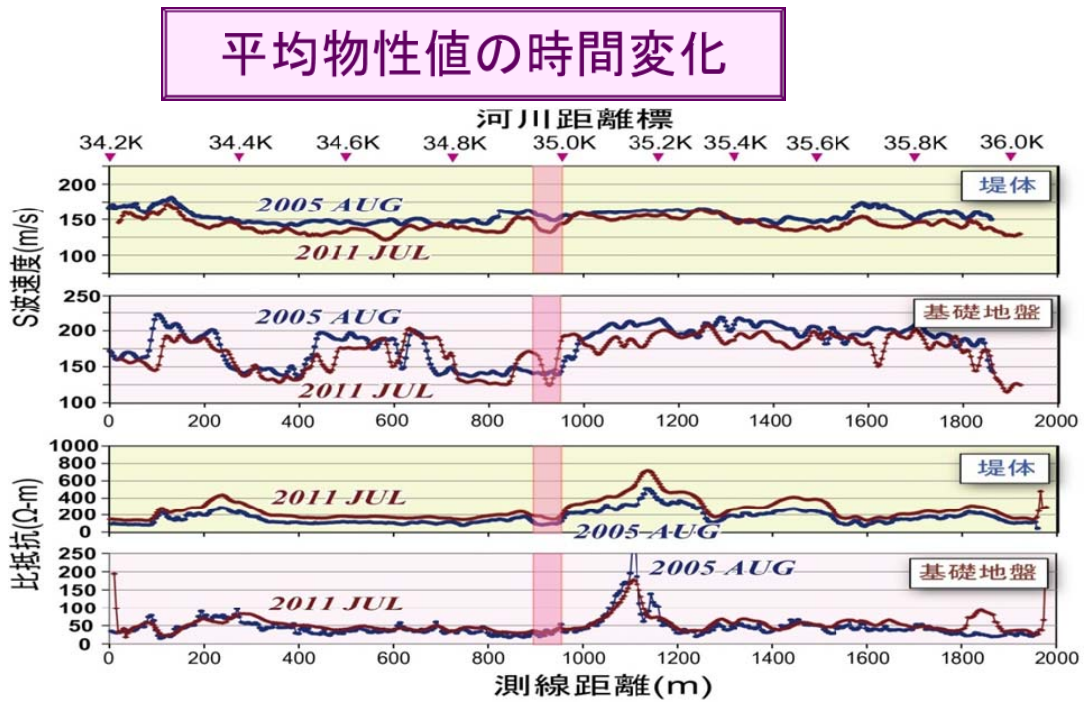


- 地震後調査は 2011 年 7 月に実施.
- (a) 表面波探査による S 波速度構造断面
- (b) 牽引式電気探査による比抵抗断面
- (c) 変形に対する安全性評価断



- (a) 地震前 S 波速度構造断面
- (b) 地震後 S 波速度構造断面
- (c) 空間的変化率断面

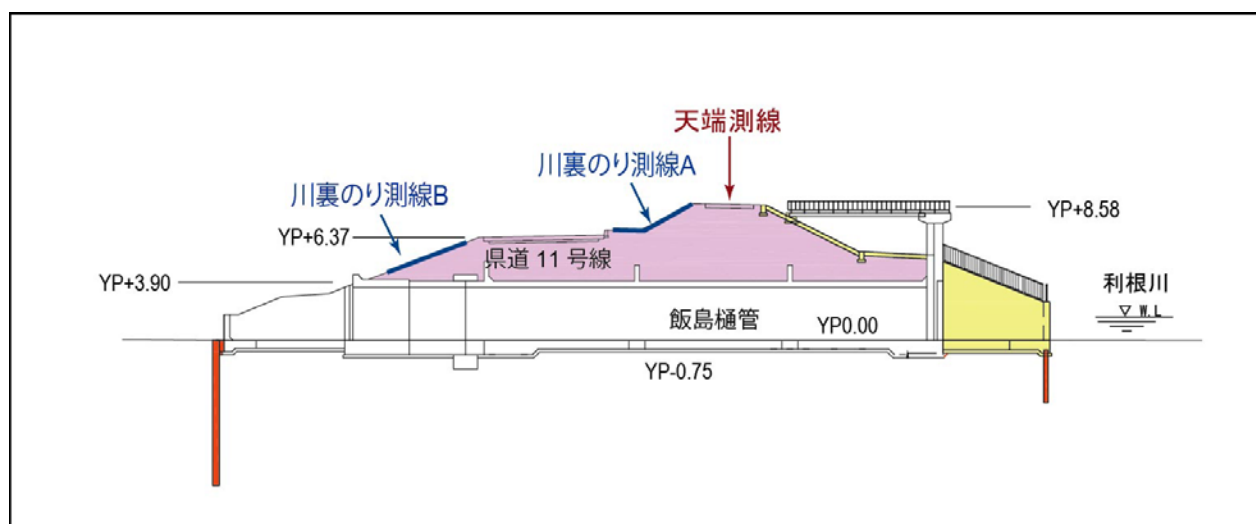
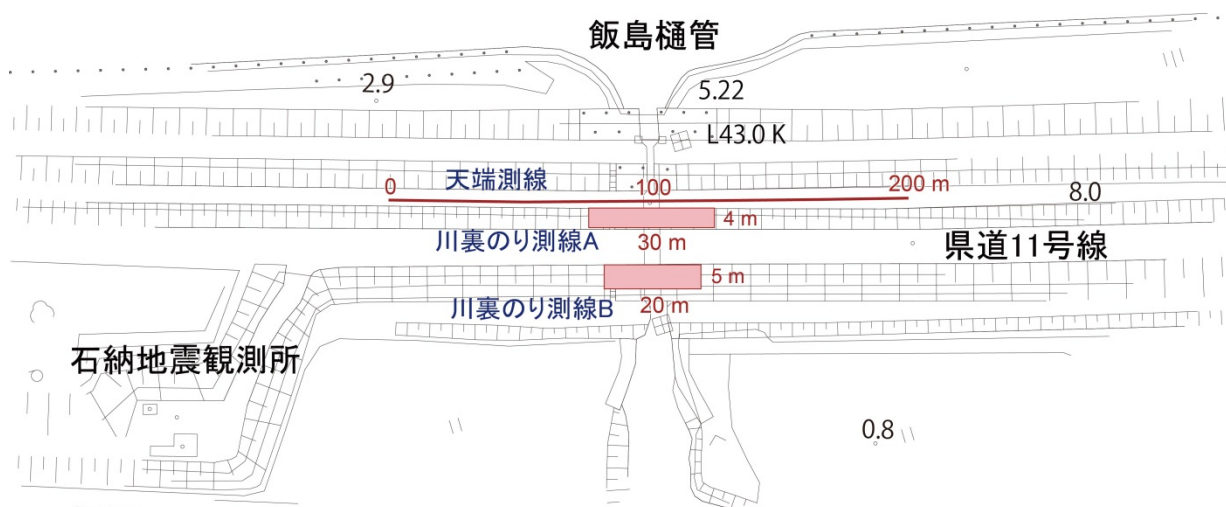
3.2.3 地震前後の物性変動



- 堤体・基礎地盤とも低 S 波速度・低比抵抗の部分で堤防損壊
- 同様な特徴を有する区間が他にも存在
- S 波速度 140m/s, 比抵抗 100/60Qm が脆弱区間抽出の目安となる
- 地震後の全般的な S 波速度低下は大ひずみ軟化継続を示唆

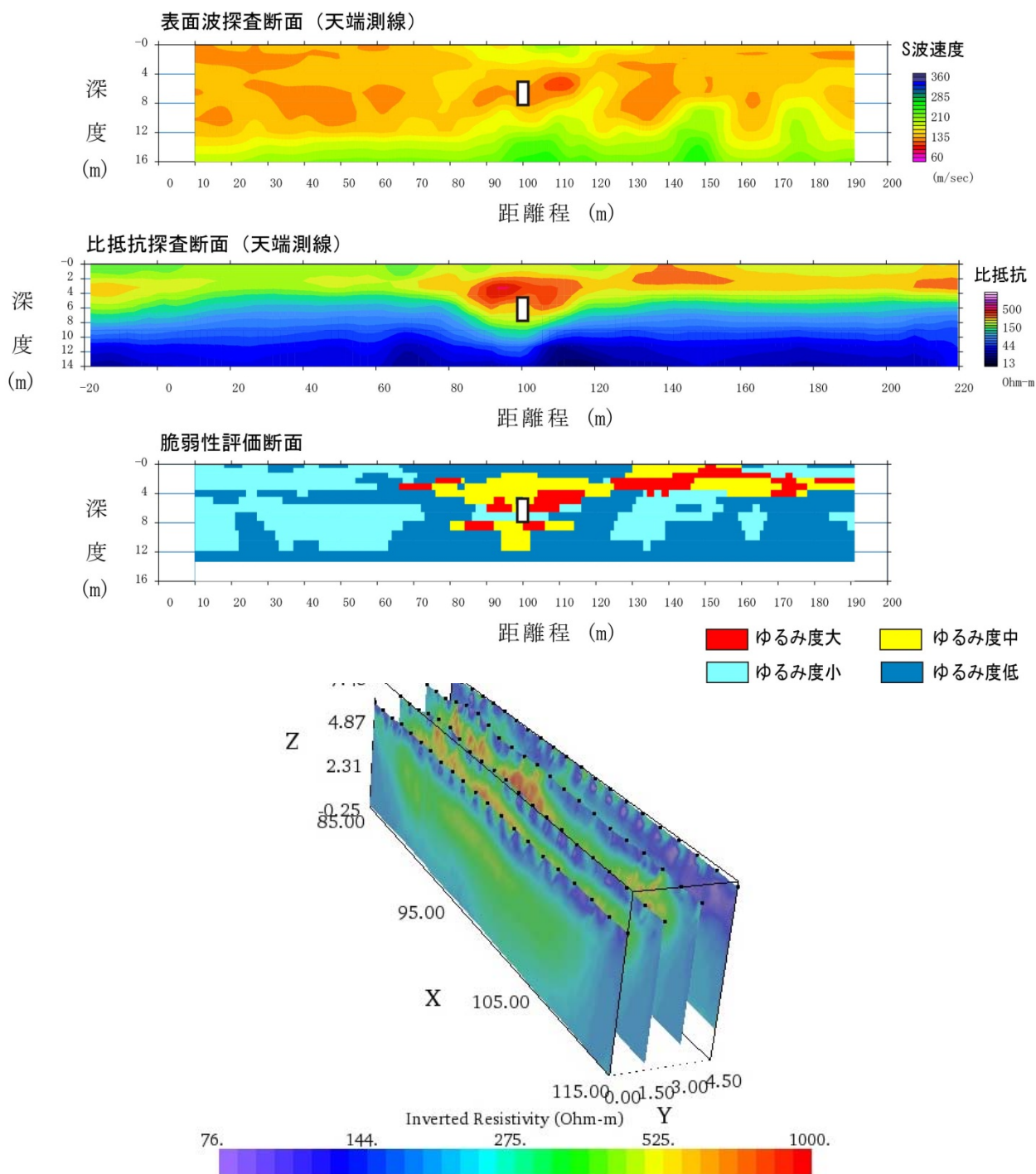
3.3 開削部調査例

3.3.1 調査対象堤防区間の概要



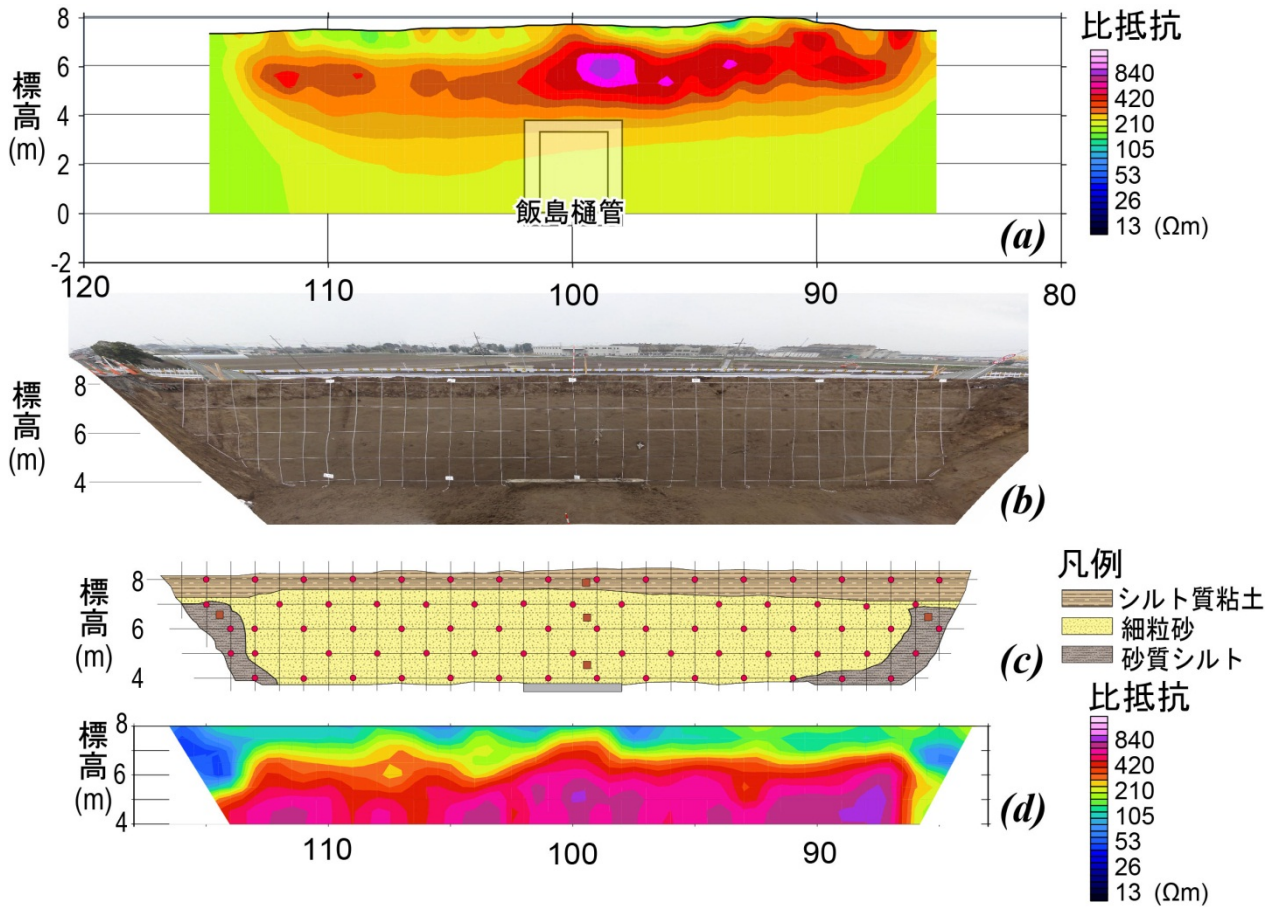
- 地震で被災を受けた樋管横断部堤防で開削を伴う補修工事前に統合物理探査
- 天端で小規模な統合物理探査
- 川裏のり部で小規模3次元電気探査実施

3.3.2 開削前調査結果概要



- 樋管設置部に特徴的 Vs・比抵抗異常(樋管直上部にのみ高比抵抗体. 両翼に低 Vs; 緩んだ砂層の存在を予測)
- 川裏のりで実施した小規模高密度比抵抗探査結果から県道上部堤体は高比抵抗. 県道から下の堤体は低比抵抗.
- 開削予定箇所は表層部はゆるみ低なるも樋管直上部ゆるみ大と評価.

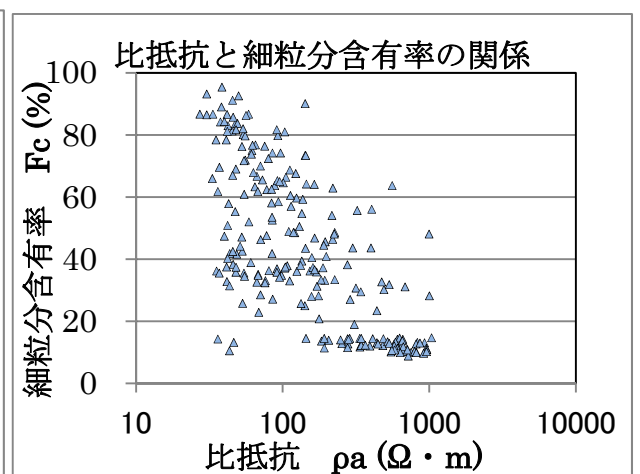
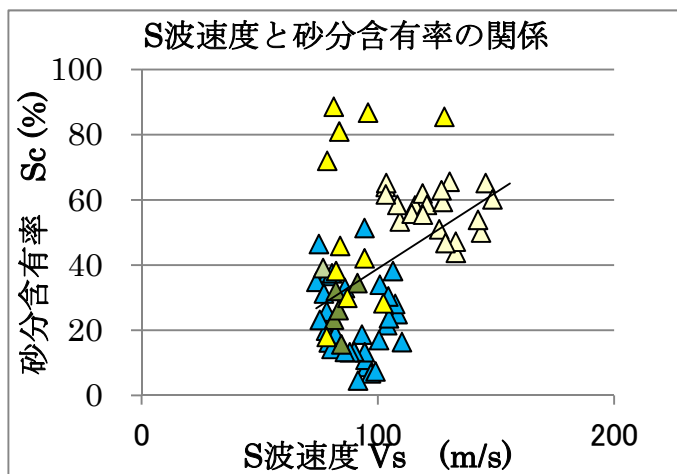
3.3.3 開削時調査結果概要



- 開削前比抵抗探査で樋管直上部にのみ高比抵抗砂層分布を把握
- 開削によって対応砂層を確認
- 開削面で比抵抗測定し、ほぼ調和的な比抵抗構造を確認。



- 地表からの統合物理探査は確実に堤防内部物性を把握している。
- 計測物性値は土質特性ともよく対応している。



(利根下流河川事務所提供)