

物理探査による河川堤防の3次元可視化とモデリング

高橋 亨*

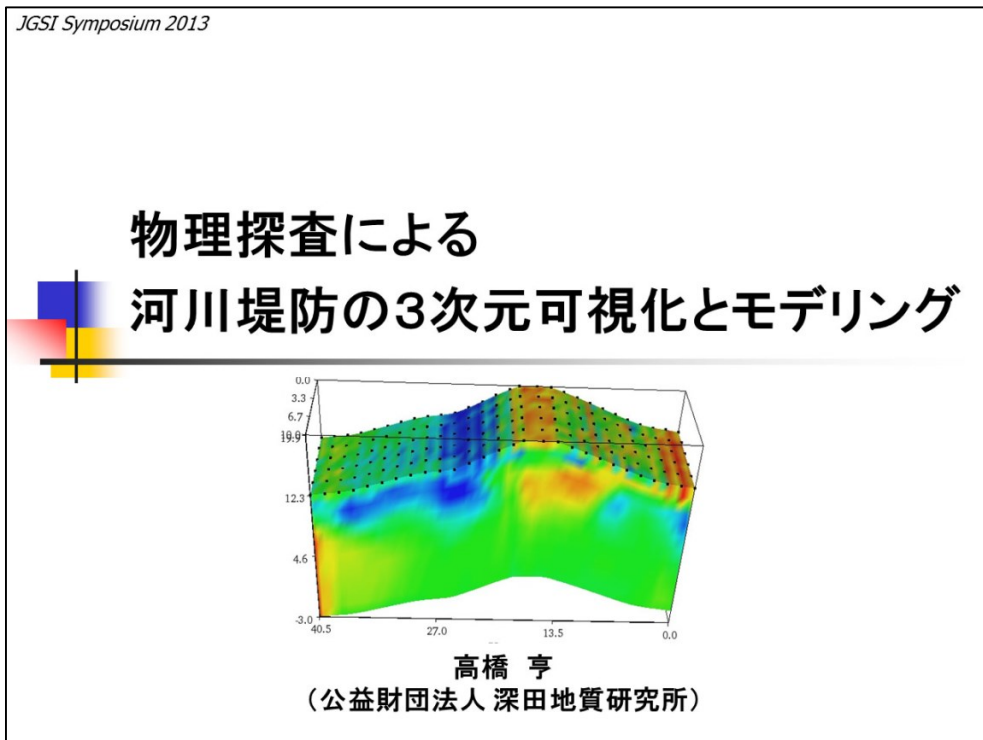
3D imaging and modeling of a river embankment with geophysical data

Toru Takahashi*

*公益財団法人深田地質研究所 Fukada Geological Institute,
2-13-12 Honkomagome, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0021, Japan. E-mail: takahashi@fgi.or.jp

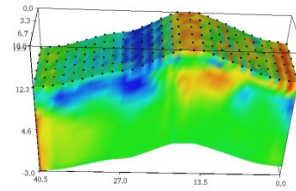
キーワード：物理探査，河川堤防，3次元

Key words : Geophysical method, River embankment, Three dimensions



話の内容

- 河川堤防の被害
- 河川堤防調査と物理探査の役割
- 河川堤防の可視化(概要調査での利用)
- 河川堤防の可視化(詳細調査における3次元可視化)
- 物理探査データを用いた河川堤防のモデリング
- まとめ



河川堤防の被害

- 九州矢部川の被災例 -

- ・近年、地震や局地的な集中豪雨等による河川堤防の被害の発生例が多く、その強靱化が求められている。
- ・特に、規模は小さくとも将来の破堤につながるような前兆的な堤体の変状(漏水、亀裂等)の報告は極めて多い。



昨年7月の九州北部豪雨で決壊した矢部川
- 冠水した九州新幹線の筑後船小屋駅付近の状況 - (NHK2012)

河川堤防の被害

- 前兆的な堤体の変状(漏水)-

H23年9月出水時に宮川右岸6.4k付近や7.2k付近の川裏等に「基盤漏水」及び「堤体漏水」が確認

国土交通省(2012)

漏水範囲

ガマの発生

基盤漏水の状況(宮川右岸6.4k付近)

堤体漏水の状況(宮川右岸6.4k付近)

堤体漏水の状況(宮川右岸7.2k付近)

2

河川堤防の被害

- 透破壊につながる恐れのある堤体と基礎地盤の土質構成 -

粘性土
砂質土
基礎地盤

堤外側の地形	堤内側の地形
a) 旧河道・自然堤防・旧川階高地	埋積された旧河道
b) 旧河道・自然堤防・旧川階高地	落堀
c) 旧河道・自然堤防・旧川階高地	氾濫低地
d) 河床・自然堤防	崖壁・基礎岩

透水性地盤 旧河道 落堀 氾濫低地 崖壁 基礎岩

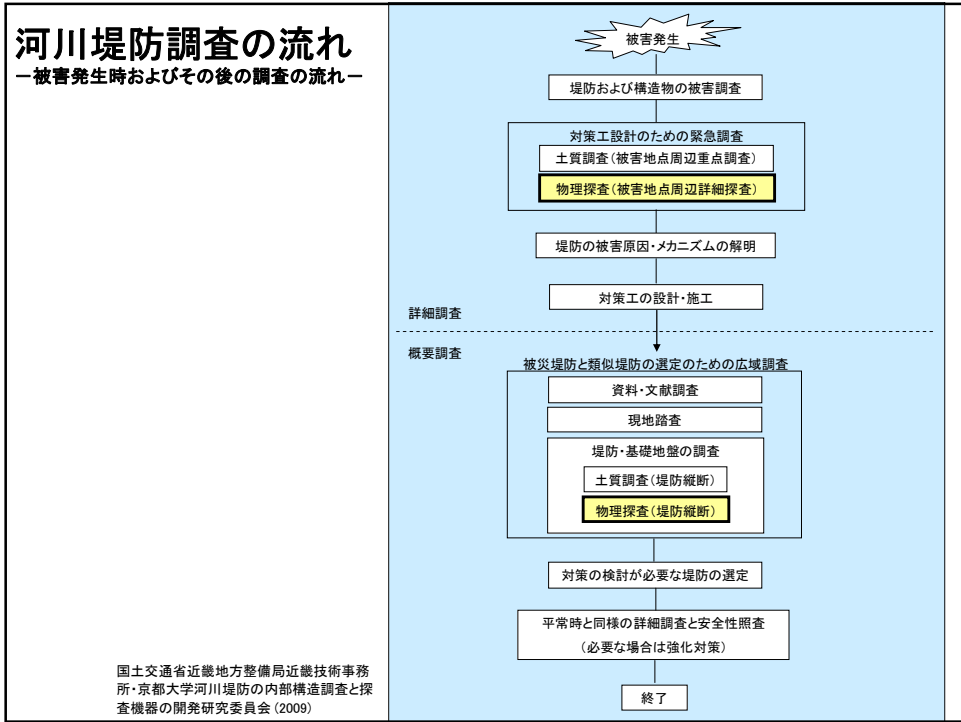
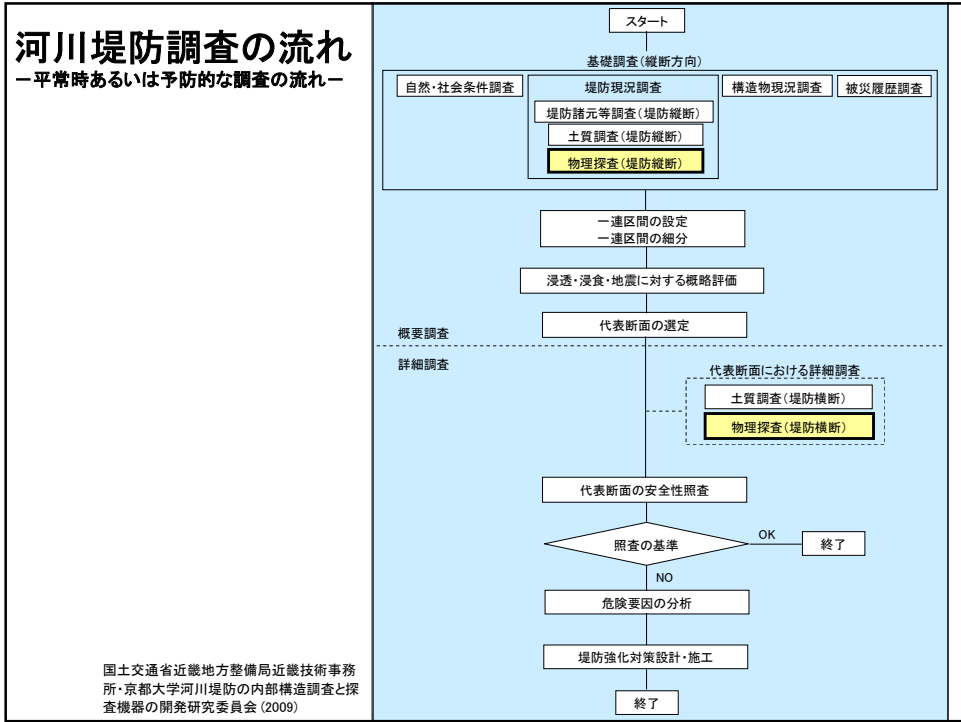
砂質土・礫質土 粘性土 崖壁・基礎岩台

堤防からの漏水 基礎地盤からの漏水

砂質土 砂は水を通しやすいため
粘性土 粘土は水を通しにくい

浸透が問題となる堤体と基礎地盤の土質構成
(国土技術研究センター、2002)

漏水被害の事例
(国土交通省近畿地方整備局、2006)



河川堤防の調査対象と要件

調査対象		具体的な事例	調査で把握すべき事項と深度	
堤体	縦断方向	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防からの漏水 ・堤防表面の亀裂 	<ul style="list-style-type: none"> ・土質構成の連続性 (弱点箇所の特定) 	0-9m
			<ul style="list-style-type: none"> ・堤体内異物の有無 (亀裂、陥没、空洞、緩み、廃棄樋門など) 	0-9m
	横断方向	<ul style="list-style-type: none"> ・堤防からの漏水 	<ul style="list-style-type: none"> ・土質構成 ・築堤履歴 	0-9m
基礎地盤	堤防縦断方向	<ul style="list-style-type: none"> ・矢部川での堤防決壊 	<ul style="list-style-type: none"> ・要注意地形の分布範囲 (旧河道、旧砂州など) ・透水層の分布、層厚 ・液状化層の分布、層厚 	15m
	堤防横断方向	<ul style="list-style-type: none"> ・矢部川での堤防決壊 ・パイピング(漏水) 	<ul style="list-style-type: none"> ・土質構成の連続性 (特に透水層の連続性) ・液状化層の分布、層厚 	15m
河川構造物周辺		<ul style="list-style-type: none"> ・護岸破損 ・樋門管内(底板下)の空洞 	<ul style="list-style-type: none"> ・樋門等の構造物周辺におけるゆるみや空洞の有無・規模 	0-9m
護岸		<ul style="list-style-type: none"> ・護岸背面空洞 	<ul style="list-style-type: none"> ・護岸背面の空洞の有無・規模 	2m

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会 (2009)

調査対象・段階に応じた探査法

調査段階	概要調査	詳細調査
要求事項	堤防を縦断方向に効率的(早く安く)に探査し、堤体、基礎地盤の概略構造や土質構成および弱部、異常部(旧河道や空洞、緩み領域等)の概略位置を推定する	ボーリングデータを補完して堤防横断面の詳細な構造や土質構成を推定する
探査基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・ベルト状の発受信機による牽引探査 ・リアルタイムに近いスピード解析 ・成果: 概略の構造や土質構成 	<ul style="list-style-type: none"> ・対象断面での横断あるいは3次元探査 ・詳細解析 ・成果: 横断面の構造や土質構成
探査手法	<ul style="list-style-type: none"> ・ランドストリーマ牽引型反射法 ・ランドストリーマ牽引型表面波法 ・牽引型電気探査 ・浅部電磁法探査 ・地中レーダ探査 ・複合探査(上記データの複合解析) 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元電気探査(2次元を含む) ・屈折法トモグラフィ ・複合探査(上記データの複合解析)
概念図		

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会 (2009)

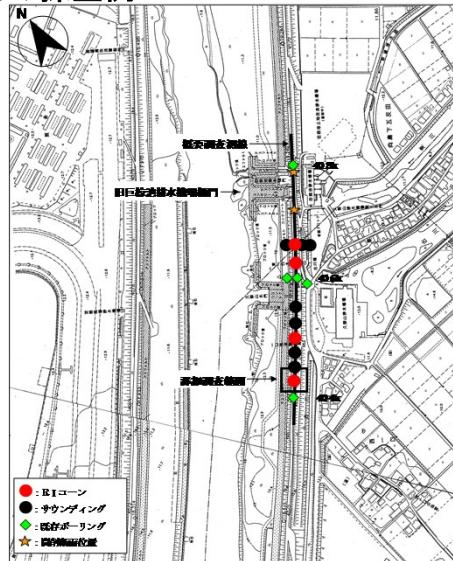
調査対象・段階に応じた探査法

調査段階	概要調査	詳細調査
要求事項	堤防を縦断方向に効率的(早く安く)に探査し、堤体、基礎地盤の概略構造や土質構成および弱部、異常部(旧河道や空洞、緩み領域等)の概略位置を推定する	ボーリングデータを補完して堤防横断面の詳細な構造や土質構成を推定する
探査基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・ベルト状の発受信機による牽引探査 ・リアルタイムに近いスピード解析 ・成果:概略の構造や土質構成 	<ul style="list-style-type: none"> ・対象断面での横断あるいは3次元探査 ・詳細解析 ・成果:横断面の構造や土質構成
探査手法	<ul style="list-style-type: none"> ・ランドストリーマ牽引型反射法 ・ランドストリーマ牽引型表面波法 ・牽引型電気探査 ・浅部電磁法探査 ・地中レーダ探査 ・複合探査(上記データの複合解析) 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元電気探査(2次元を含む) ・屈折法トモグラフィ ・複合探査(上記データの複合解析)
概念図	<p>探査結果の解釈から得られる堤体や基礎地盤の構造や弱部の推定結果図</p>	<p>Inverted Resistivity (Ohm m)</p>

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会(2009)

河川堤防の可視化(概要調査での利用)

-宇治川での探査例-



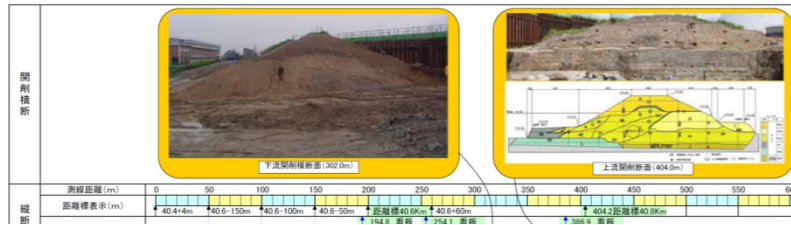
測線配置と土質調査位置

(実線: 概査測線500m, 矩形範囲: 精査範囲)

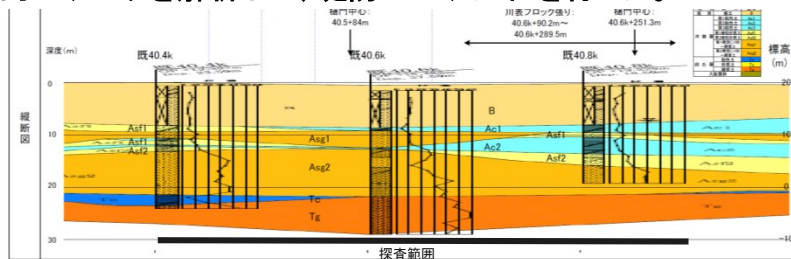
測線位置

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会(2009)

河川堤防の可視化(概要調査での利用) -宇治川での探査例-

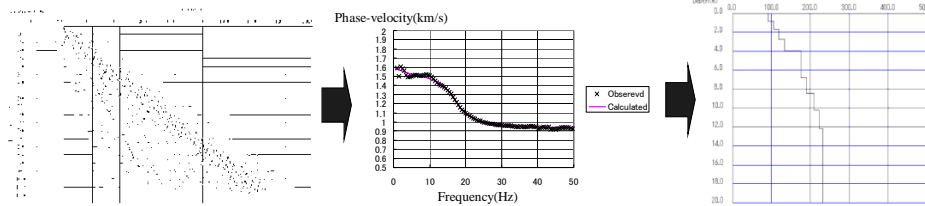
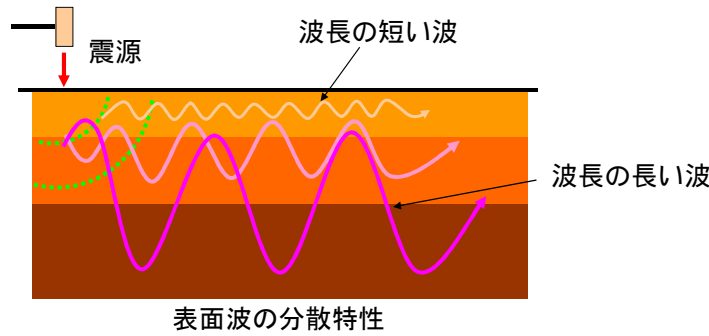


表面波探査(S波速度分布)と牽引式電気探査(比抵抗分布)を実施し、複合的にデータを解析して、堤防のモデル化を行った。



国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会 (2009)

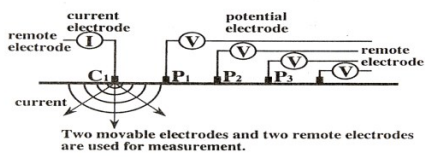
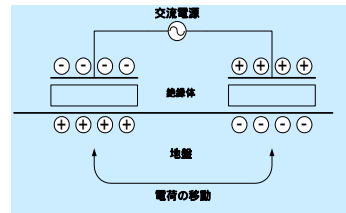
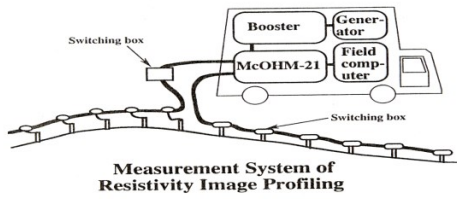
表面波探査の探査原理と解析法



表面波探査の測定方法



(牽引型)電気探査の探査原理



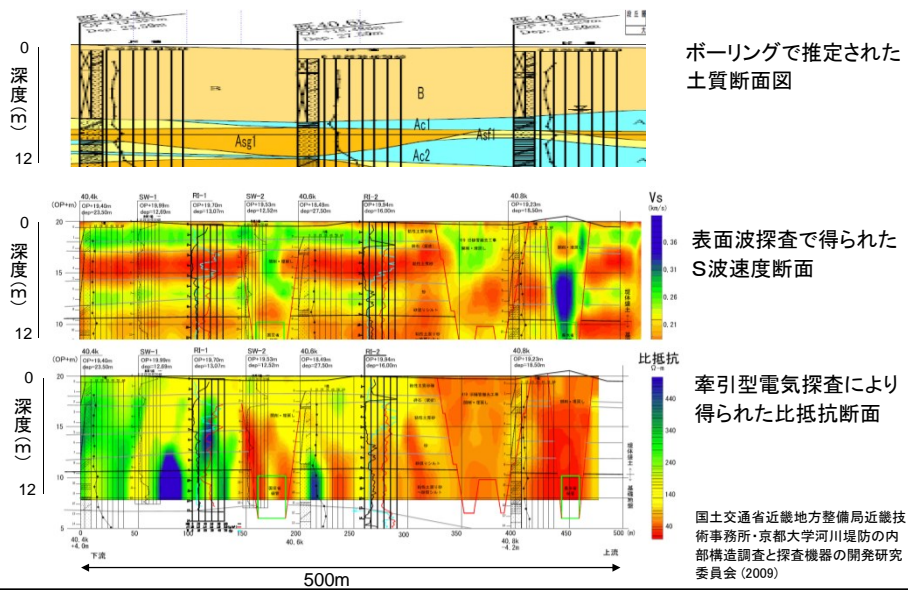
Two movable electrodes and two remote electrodes are used for measurement.



牽引型電気探査の測定方法



河川堤防の可視化(概要調査での利用) -宇治川での探査例-

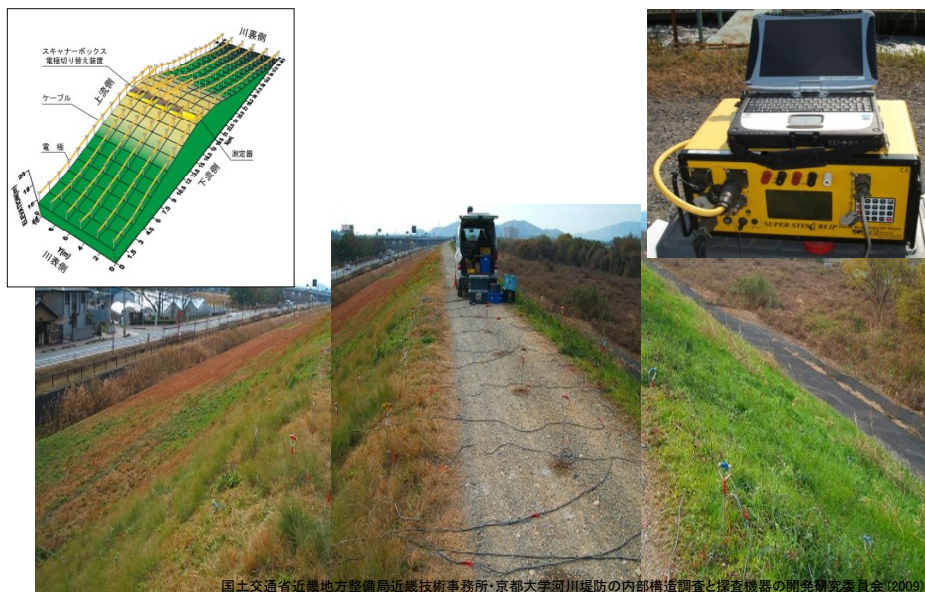


調査対象・段階に応じた探査法

調査段階	概要調査	詳細調査
要求事項	堤防を縦断方向に効率的(早く安く)に探査し、堤体、基礎地盤の概略構造や土質構成および弱部、異常部(旧河道や空洞、緩み領域等)の概略位置を推定する	ボーリングデータを補完して堤防横断面の詳細な構造や土質構成を推定する
探査基本仕様	<ul style="list-style-type: none"> ・ベルト状の発受信機による牽引探査 ・リアルタイムに近いスピード解析 ・成果: 概略の構造や土質構成 	<ul style="list-style-type: none"> ・対象断面での横断あるいは3次元探査 ・詳細解析 ・成果: 横断面の構造や土質構成
探査手法	<ul style="list-style-type: none"> ・ランドストリーマ牽引型反射法 ・ランドストリーマ牽引型表面波法 ・牽引型電気探査 ・浅部電磁法探査 ・地中レーダ探査 ・複合探査(上記データの複合解析) 	<ul style="list-style-type: none"> ・3次元電気探査(2次元を含む) ・屈折法トモグラフィ ・複合探査(上記データの複合解析)
概念図	<p>探査結果の解釈から得られる堤体や基礎地盤の構造や弱部の推定結果図</p>	<p>Inverted Resistivity (Ohm m)</p>

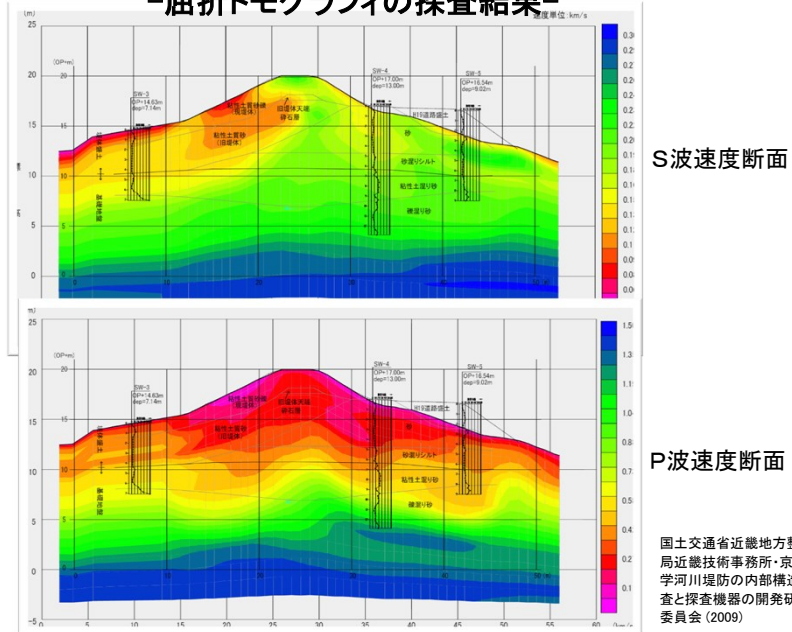
国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会(2009)

河川堤防の可視化(詳細調査での利用) -3次元電気探査の測定方法-

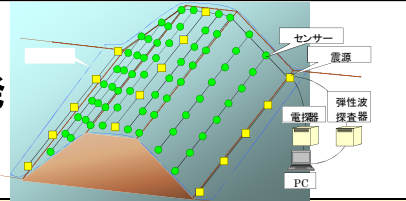


国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会(2009)

河川堤防の可視化(詳細調査での利用) -屈折トモグラフィの探査結果-



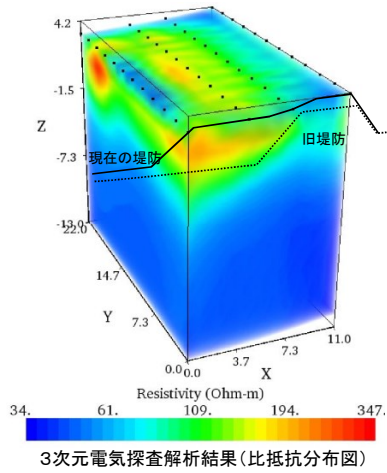
3次元堤防可視化装置の開発



名称	仕様	備考
3次元可視化装置	ベルトスリング型ランドストリーマ 70mm × 50m 12測点/本 受振器ベース & 電極一体型 測点間隔4m(最大) 上下動受振器・水平動受振器 交互配置 受振器: MarkProduct L40-A 電極: ステンレス製	4セット (8セット予定)



3次元堤防可視化装置の評価試験



評価試験作業状況

高橋ほか(2012)

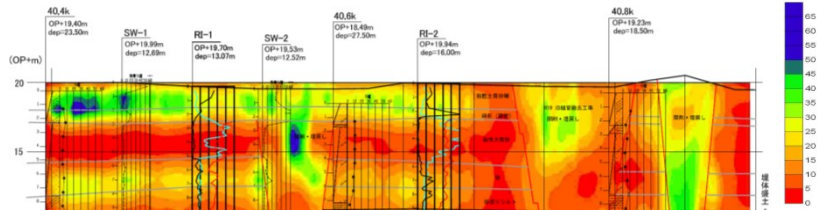
物理探査データを用いた河川堤防のモデリング

—物理探査で得られる物性と河川堤防調査に必要な特性の関係—

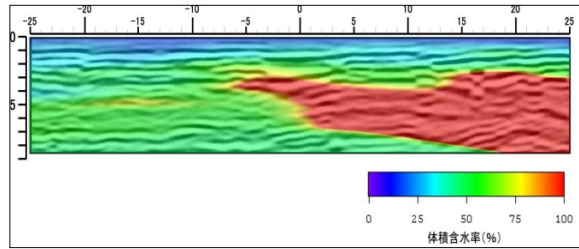
物理探査手法及び得られる物性		河川堤防調査で求められる特性																																			
手法	物性	土質構成	力学的特性 (密度、N値、一軸圧縮強度等)	水理学的特性 (間隙率、透水係数等)																																	
弾性波探査	屈折法	P波速度 (Vp) S波速度 (Vs) (体積弾性率) (剛性率) (密度)																																			
	反射法																																				
電気探査	表面電位法	比抵抗																																			
	比抵抗法 (牽引型) (電極打設型)																																				
電磁探査	自然電位法	電磁波速度 (誘電率) (比抵抗)																																			
	電磁法 (周波数領域)																																				
電磁探査	電磁法 (時間領域)	<table border="1"> <thead> <tr> <th>土質</th> <th>土質</th> <th>土質</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>粘土 (液限)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>2~6</td> </tr> <tr> <td>粘土 (塑性)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (液限)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (塑性)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (液限)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (塑性)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (液限)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (塑性)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (液限)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> <tr> <td>粘土 (塑性)</td> <td>$10^{-2} \sim 10^{-1}$</td> <td>10~20</td> </tr> </tbody> </table>	土質	土質	土質	粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	2~6	粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20	粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20		
	土質		土質	土質																																	
粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	2~6																																			
粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (液限)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
粘土 (塑性)	$10^{-2} \sim 10^{-1}$	10~20																																			
電磁法 (時間領域)																																					
地中レーザ (パルス型) (連続波型)																																					
複合探査	複数の探査法の組み合わせ	弾性波速度 比抵抗 電磁波速度 など	例えば、弾性波速度と比抵抗の両物性分布から土質構成をより高精度に推定することができる	<p>弾性波速度と比抵抗の2つの値から、各種特性との経験式をベースに、変形係数やC、Φなどの強度定数、あるいは間隙率、飽和度などの水理学的特性を推定することができる。</p>																																	

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会(2009)

物理探査データを用いた河川堤防のモデリング —特性間の相関関係、経験式を利用する方法—



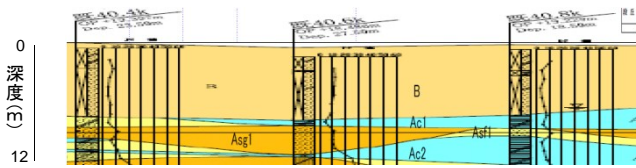
S波速度とN値の相関関係をもとに、表面波探査によるS波速度からN値断面を推定した結果



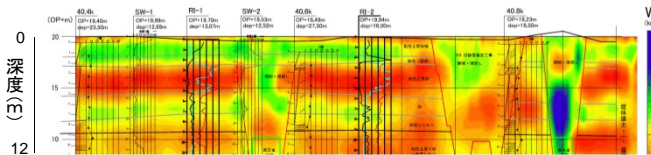
比誘電率(電磁波速度)と体積含水率の経験式をもとに、地中レーダ探査による電磁波速度から体積含水率を推定した結果

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会 (2009)

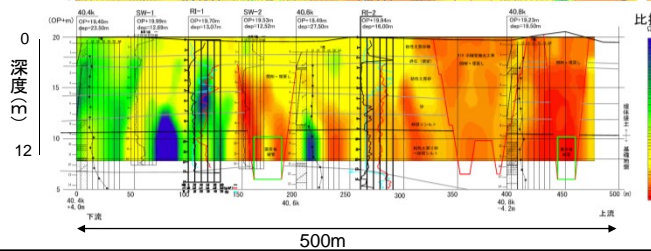
物理探査データを用いた河川堤防のモデリング —物理モデルを利用する方法—



ボーリングで推定された土質断面図



表面波探査で得られたS波速度断面

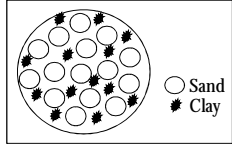


牽引型電気探査により得られた比抵抗断面

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会 (2009)

物理探査データを用いた河川堤防のモデリング

—物理モデルを利用する方法—



Unconsolidated sand model

$$K_{dry} = \left[\frac{\phi / \phi_0}{K_2 + (4/3)G_2} + \frac{1 - \phi / \phi_0}{K_s + (4/3)G_2} \right]^{-1} - \frac{4}{3}G_2$$

$$G_{dry} = \left[\frac{\phi / \phi_0}{G_2 + Z} + \frac{1 - \phi / \phi_0}{G_s + Z} \right]^{-1} - Z \quad \text{Hashin-Shtrikman Model}$$

$$Z = \frac{G_2}{6} \frac{9K_2 + 8G_2}{K_2 + 2G_2}$$

$$K_2 = \left[\frac{n^2(1-\phi_0)^2 G_s^2 P}{18\pi^2(1-\nu_s)^2} \right]^{1/3} \quad \text{Hertz-Mindlin Model}$$

$$G_2 = \left[\frac{5-4\nu_s}{5(2-\nu_s)} \left[\frac{3n^2(1-\phi_0)^2 G_s^2 P}{2\pi^2(1-\nu_s)^2} \right]^{1/3} \right]$$

$$K_s = \{(1-C)K_{sand} + CK_{clay} + 1/((1-C)/K_{sand} + C/K_{clay})\} / 2$$

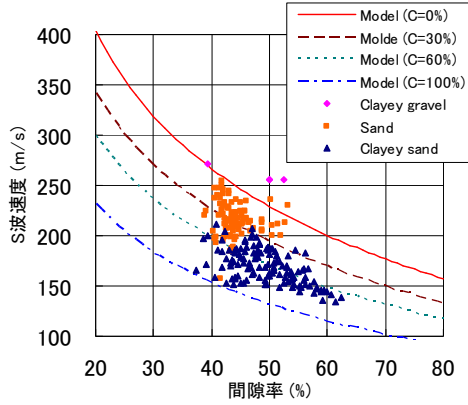
$$G_s = \{(1-C)G_{sand} + CG_{clay} + 1/((1-C)/G_{sand} + C/G_{clay})\} / 2$$

Hill average

$$K_{sat} = K_{dry} + \frac{(1 - K_{dry} / K_1)^2}{\phi / K_f + (1 - \phi) / K_1 - K_{dry} / K_1^2}$$

Gassmann's Relation

$$G_{sat} = G_{dry}$$

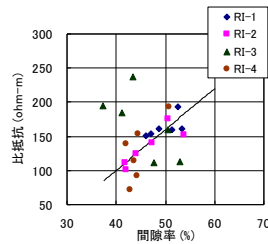
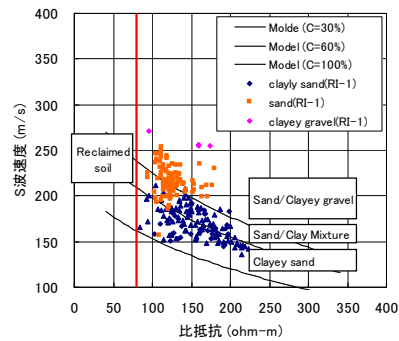
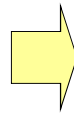
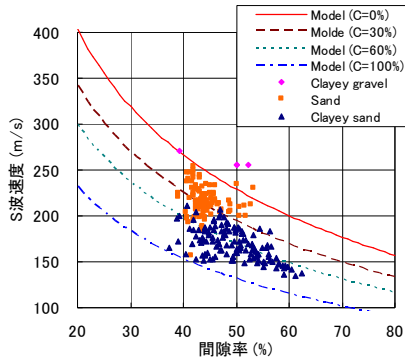


n	5	Coordination number
ϕ_0	0.8	Critical porosity
K_{clay}	21 GPa	Bulk modulus of clay
G_{clay}	7 GPa	Shear modulus of clay
K_{sand}	36.6 GPa	Bulk modulus of Quartz
G_{sand}	45GPa	Shear modulus of Quartz

Takahashi & Yamamoto (2010)

物理探査データを用いた河川堤防のモデリング

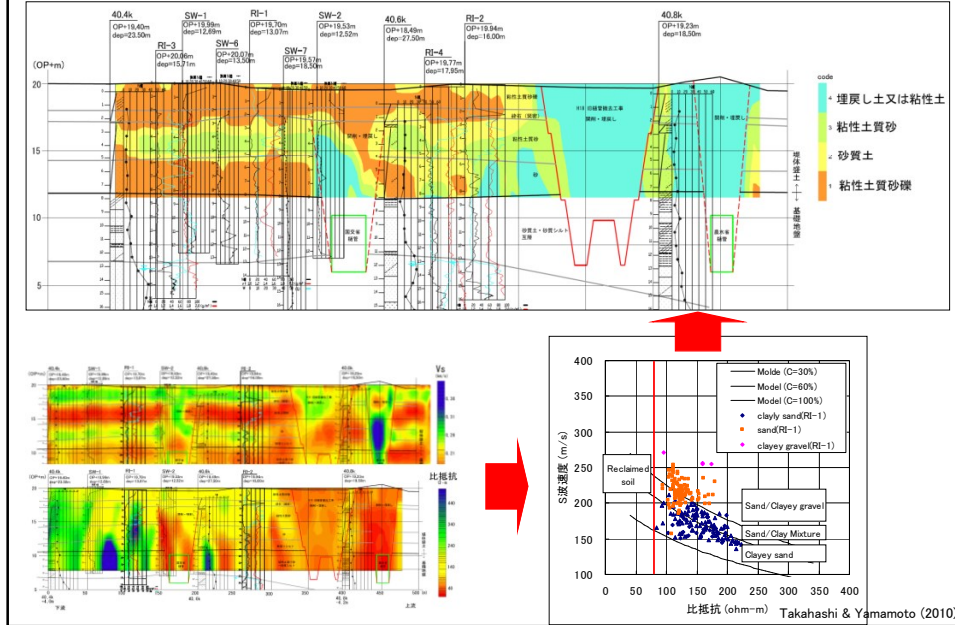
—物理モデルを利用する方法—



Takahashi & Yamamoto (2010)

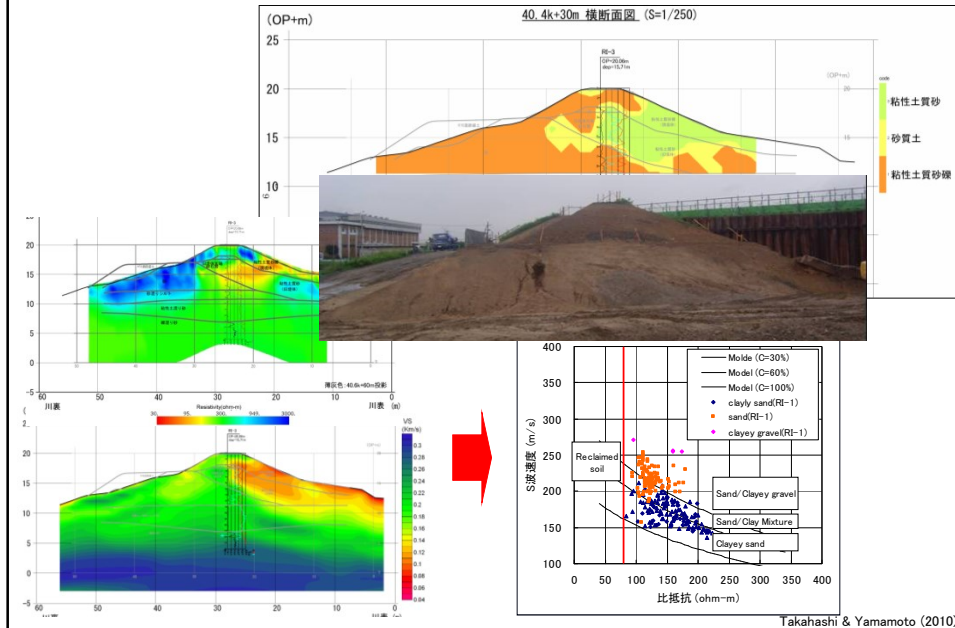
物理探査データを用いた河川堤防のモデリング

— 物理モデルを利用する方法により推定された土質断面 —



物理探査データを用いた河川堤防のモデリング

— 物理モデルを利用する方法により推定された土質断面 —



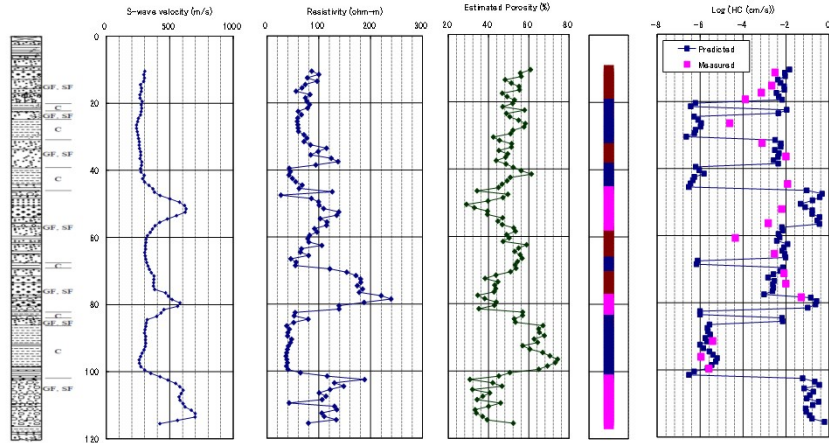
物理探査データを用いた河川堤防のモデリング

—S波速度と比抵抗を利用した透水係数の推定法—

探査データから透水係数の推定 (飽和地盤での適用)
(Koseny-Carmanの式+ Rock Physicsに基づく方法)

砂礫: 1mm
砂 : 0.1mm
粘土: 0.001mm

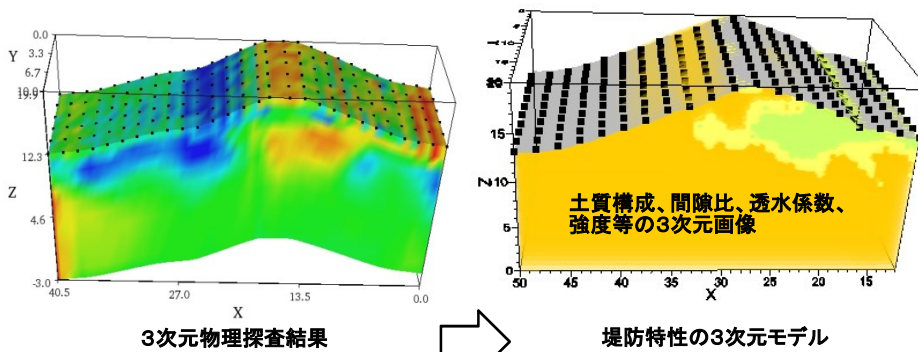
$$\kappa = B \frac{\phi^3}{(1-\phi)^2} d^2$$



高橋・稲崎 (2013)

物理探査データを用いた河川堤防のモデリング

—複数の物理探査データを利用した河川堤防の3次元モデリング—

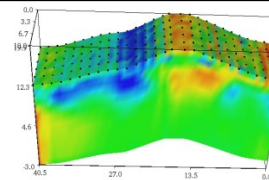


Takahashi et al. (2013)を修正

まとめ

- 河川堤防内部を非破壊的に可視化する技術として物理探査が利用されている。
- 特に、横断を対象にした詳細調査において3次元探査が適用され、探査物性による3次元可視化が行われている。
- 3次元探査を効率的に実施するための複合探査装置の開発や探査で得られた弾性波速度や比抵抗値を複合的に解析し、堤防の土質構成、さらには透水係数等のモデル化も試みられている。
- 近い将来、複数の3次元物理探査による河川堤防の3次元モデル化が可能となると考えられる。

謝辞



本講演で使用させていただいたデータの多くは、以下の研究で取得、解析されたデータです。関係者の皆様にここに記して感謝いたします。

■ 京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究(2006年～2008年)

国土交通省近畿地方整備局近畿技術事務所・京都大学河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究委員会(2009):河川堤防調査における物理探査適用の手引き-新しい技術の適用を中心に-

Takahashi T. and Yamamoto T., 2010, An attempt at soil profiling on a river embankment using geophysical data, Exploration Geophysics, 41, 102-108.

■ 国土交通省建設技術開発助成事業-被災堤防緊急対応のための3次元堤防可視化ツール及び対策工設計システムの開発-(実施中)

高橋亨・相澤隆生・西尾英貴・松岡俊文(2012):被災堤防緊急対応のための3次元可視化ツール及び対策設計支援システムの開発-研究開発の全体計画と2011年度成果の概要-, 物理探査学会第127回学術講演会講演論文集, 63-66.

村田和則・相澤隆生・高橋亨・松岡俊文(2012):被災堤防緊急対応のための3次元可視化ツール及び対策設計支援システムの開発(その2)-3次元可視化ツールの概要-, 物理探査学会第127回学術講演会講演論文集, 67-69.

Takahashi T., Aizawa T., Nishio H. and Matsuoka, T., 2013, 3D geophysical soil profiling system for supporting countermeasure design for damaged river embankments, Proc. of Near-Surface Geophysics Asia Pacific Conference.

■ 河川整備基金助成事業-統合物理探査による河川堤防の安全性評価技術の開発-(実施中)

高橋亨・稲崎富士(2013):物理探査データを用いた河川堤防の浸透性の推定, 物理探査学会第128回学術講演会講演論文集, 166-169.

