

河川砂防技術研究開発 【成果概要】

①研究代表者	氏名 (ふりがな)	所属	役職	
	みむら まもる 三村 衛	京都大学大学院工学研究科都市社会工学専攻	教授	
②研究テーマ	名称	電気探査および統合型貫入試験による堤防断面土質モデルの構築に関する技術開発		
	政策領域	[分野] (河川技術分野)	融合技術	物理探査学+地盤工学
		[公募課題] 堤防及び河川構造物(コンクリートまたは鋼構造物)の点検・診断の高度化技術研究開発		(電気探査, 統合型貫入試験)
③研究経費 (単位: 万円)	平成 年度	平成 年度	平成 年度	総 合 計
※端数切り捨て。	1733万円	1810万円	1036万円	4579万円
④研究者氏名	(研究代表者以外の研究者の氏名、所属・役職を記入下さい。なお、記入欄が足りない場合は適宜追加下さい。)			
氏 名	所属・役職 (※平成28年3月31日現在)			
肥後陽介	京都大学大学院工学研究科・准教授			
小山倫史	関西大学社会安全学部・准教授			
城森 明	(有)ネオサイエンス・代表取締役			
吉村 貢	ソイルアンドロックエンジニアリング技師長			
俵 智重	ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 課長			
井上恵介	ソイルアンドロックエンジニアリング(株) 課長			
⑤研究の目的・目標	(申請書に記載した研究の目的・目標を簡潔に記入下さい。)			
<p>本研究の目的は、河川堤防の安全性を確保するために、堤体の土質構造をモデル化する技術開発を行うことである。線状構造物である堤防に関する情報を広域的に把握できる、物理探査手法を適用することを方針とし、これを短期間で効率的に実施できる、牽引式電気探査法を導入する。また、三次元化の必要性を念頭におき、堤防縦断方向に平行して複数測線における探査を実施し、その間を線形補間法によって内挿することにより、堤体の三次元電気比抵抗モデルを構築する。一方、土質構造を把握するという観点から、RIコーンと電気比抵抗コーンから成る、統合型貫入試験を導入し、RIコーンによって得られる電気式静的コーンの三成分(先端抵抗q_t、周面摩擦f_s、間隙水圧u)とRI計測による湿潤密度ρと含水比wから、調査地点深さ方向に対する土質区分を求め、併せて実施する電気比抵抗コーンによる電気比抵抗の深度分布の相互関係から、礫・砂質土、中間土、粘性土という土質区分と電気比抵抗値の対応を数値化し、土質区分境界の閾値を設定する。この関係を先に求めた電気比抵抗の三次元モデルに適用することによって、対象とする堤防の三次元土質モデルを構築することができる。本研究では、こうした実験を、3カ年にわたり、木津川、紀ノ川、由良川、木曾川、信濃川の5河川において実施することによってデータの蓄積を図り、牽引式電気探査と統合型貫入試験に基づく、堤防の三次元土質モデルを構築する手法に関する技術開発を目指して研究を進めた。</p>				

⑥研究成果

(様式 A-11と同じ内容について、具体的にかつ明確に記入下さい。)

1. 研究の背景・目的

近年温暖化に伴って多発する集中豪雨や想定を超える大型台風により、越流事象も少なくなく、長時間計画高水位を超え続けたりすることもあり、堤防への負荷が高まり、堤防崩壊を引き起こすケースが増えている。破堤は越流によって起こることが多いが、浸透破壊による破堤、すなわち越流することなく破堤に至った矢部川の事例もある。この破堤の要因として、現地地盤内に1～1.5mの高透水性の砂層が認められ、いわゆるパイピング現象を伴う浸透破壊が起こった可能性が示唆されている。このように、破堤のモードが多岐に及んでおり今まで以上に堤防の質的整備の重要性が高まっている¹⁾。

本研究では、線状構造物である堤防の構造を広域的・効率的に把握するために、牽引式電気探査(オームマップパー)を導入し、対象とする堤防縦断方向に複数測線に沿って電気探査を行い、測線間を線形補間することにより、堤体の三次元電気比抵抗構造モデルを作成する。一方、任意の横断面においてRIコーンと電気比抵抗コーンから成る統合型貫入試験を実施し、貫入時に得られる力学的諸値と電気比抵抗値との関係に基づいて、堤防の三次元土質構造モデルを構築することを主たる目的としている。

2. 牽引式電気探査

本研究では、比抵抗探査法の中でも機動性に優れたキャパシタ電極カップル型牽引式電気探査手法(GEOMETRICS製Ohm Mapper; オームマップパー)を適用した。通常の電気探査では、計測測線に沿って電極棒を多点において地盤に差込み、ある電極(電流電極)間に電流を流し、他の電極間における電圧を計測することで地盤の電気的特性を求める。電極配置や測線の選定に自由度があり、目的に応じた計測が可能であるという特長がある一方、長い距離の計測や試験に長い時間を要するため、本研究で行うような堤防縦断方向に複数測線で長距離を繰り返し計測するようなケースでは実用的ではないと判断した。本研究で適用したオームマップパーは、電極に工夫を加え、ダイポール・ケーブルと称される容量型電極を使用して、交流電流を与えることによってダイポール・ケーブルと地表間に電磁波が誘起され、この電磁波によって地盤内部に電流が流れるというシステムを有している。この誘導電流による電圧を計測するシステムにより、ダイポール・ケーブルを電極代わりに用いるという計測コンセプトを有する電気探査法であり、牽引しつつ電気探査が可能であるため、機動性に富み、線状構造物である堤防の探査に適している。既往研究から地表から10m程度までの電気探査が可能であるとされている²⁾。

3. 統合型貫入試験

電気式静的コーンは、毎秒 $20\pm 5\text{mm}$ の速度で静的に貫入した時の地盤の応答(抵抗)として、コーン貫入抵抗 q_c 、周面摩擦 f_s 、および間隙水圧 u の三成分を測定する。測定値は基本的に連続で、サンプリングレートは毎秒や単位貫入長さ(例えば、 50mm)毎に設定される。1m区間に20組以上のデータという細かさである。

統合型貫入試験は、上述した電気式静的コーンに γ 線散乱型RI密度計と中性子散乱型RI水分計を組み合わせたRIコーン貫入試験機(RI-CPT)⁸⁾を原型器としている。RIコーンは電気式静的コーンの直背に線源と検出管を内蔵した形となっており、密度を測定する γ 線源を配置した密度コーンと中性子線源を配置した水分コーンから成る。したがって、電気式静的コーンの力学情報とともに、地盤の湿潤密度と含水比を貫入と同時に深さ方向に連続して測定できるという特長を有している。三成分に比べて分解能が高いため、薄い弱層であっても密度低下と含水比上昇という形で探知することができ、堤体内にある危険部位の同定に力を発揮するツールである。

貫入時に測定される先端抵抗と周面摩擦から次式で示す指標によって土質分類を行うことができる³⁾。

$$Q_t = \frac{q_t - \sigma_v}{\sigma_v} \quad (1)$$

$$F_r = \frac{f_s}{q_t - \sigma_v} \quad (2)$$

電気比抵抗コーンの一般構造は、絶縁体中に4つの電極を配置して、外側2極に高周波電流を与え、内側2極で抵抗を測定する4極ウェンナー法を適用している。地盤に貫入するとコーンが接触する孔壁を介して周辺地盤の電気比抵抗を深さ方向に連続的に測定することができ

る。

以上のように、統合型貫入試験により、貫入地点における土質区分ができ、土質柱状図を描くことができる。同時に、電気比抵抗値も測定されるので、土質区分と電気比抵抗値の関係を求めることができ、電気比抵抗値を礫、砂、中間土、粘土といった土質と1対1に対応づけることができる。

4. 牽引式電気探査と統合型貫入試験による三次元土質モデル構築手法

面的な広がりをもって広域の情報を地表から取得できる物理探査と、点情報ではあるが、土質区分を正解値として得ることができる統合型貫入試験の特長を合わせることによって、情報空白部を保管することによって、点情報を多次元に展開するという思想で、図-1に示すような堤防の三次元土質モデル構築手法を提案する。

- ① 調査区間となる堤防の縦断方向に牽引式電気探査を実施する。この時、堤防の断面を包含する平行する複数測線を設定し、同距離をカバーするように堤防、および基礎地盤の電気比抵抗値を測定しておく。
- ② 堤防縦断方向の電気比抵抗値分布から、堤防の構造を概観し、調査区間を代表すると思われる地点を確定し、その断面において統合型貫入試験を実施する。
- ③ 堤防を包含する複数測線に沿って実施した牽引式電気探査の結果は、図-2に示すような堤防縦断方向の測線に沿ってパネル表示のような形で電気比抵抗値分布図が並列に並ぶように得られる。
- ④ 図-2の電気比抵抗値のパネル状のデータセットを基に、線形補間法を用いて、パネル間を補間することによって、調査区間における堤防の三次元電気比抵抗

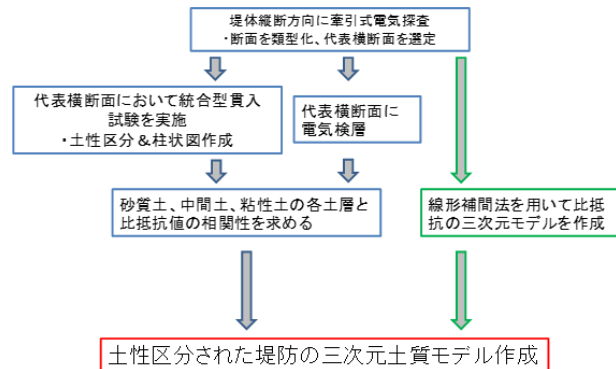


図-1 牽引式電気探査と統合型貫入試験から三次元土質構造

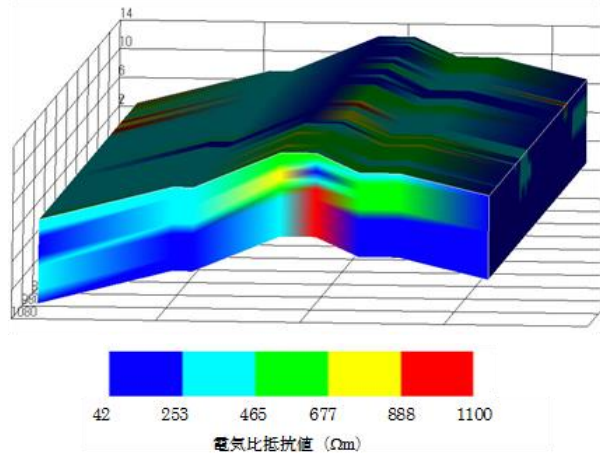


図-3 各測線の測定値を線形補間によって展開して作成した木曽川堤防の三次元電気比抵抗値モデル

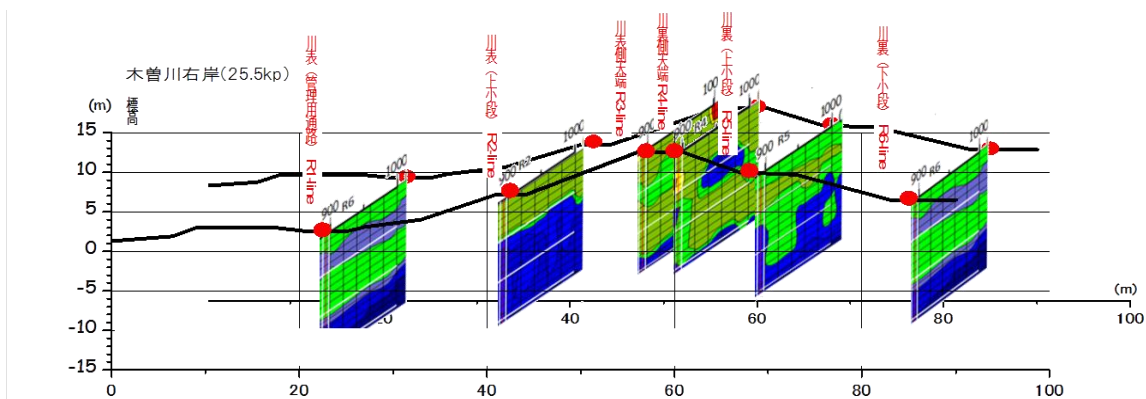


図-2 堤防縦断方向に実施した牽引式電気探査によって得られる各測線に沿った電気比抵抗値分布(木曽川の事例)

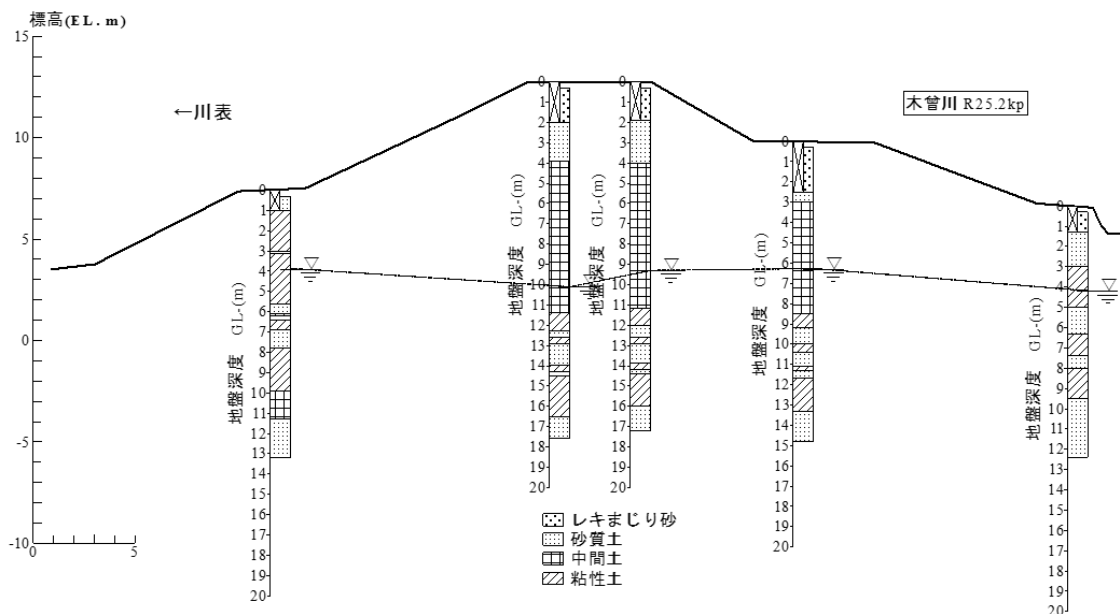


図-4 統合型貫入試験による木曾川代表断面の土質モデル

抗値構造モデルを作成する。なお、本研究においては、可視化にあたりMicroAVS（サイバネット社）を用いた。

⑤ 図-2において詳細調査を行う断面が決まると、縦断方向の牽引式電気探査を実施した測線上を第一候補として、統合型貫入試験を実施する。例えば図-2に示す木曾川堤防のケースでは、最大6点で統合型貫入試験を実施し、測線上の堤体深さ方向の一次元土質区分モデルを図-3に示すように作成する。本研究では、堤体の構造に着目しており、河川敷の1測線についてはモデル化の段階で除いて検討したため、5測線分の土質柱状図を示している。

⑥ 土質区分モデルにおける深度ごとの土質と同時に実施している電気比抵抗コーンによる電気比抵抗値の深度方向分布とを比較し、土質と電気比抵抗値の関係を図-5のように求め、各土質の電気比抵抗値の範囲、土質間境界の閾値を設定する。木曾川については、砂礫・砂は $900\Omega\text{m}$ 以上、粘性土は $200\Omega\text{m}$ 以下と設定した。

⑦ 図-3に示す木曾川堤防の三次元電気比抵抗値モデルに図-5に示す土質区分と電気比抵抗値の関係を適用し、電気比抵抗値を土質区分に転換することによって、堤防の三次元土質構造モデルを構築する。

構築した三次元土質構造モデルに関し、例えば、木曾川堤防について対象区間における $2000\Omega\text{m}$ 以上の領域（確実に砂、砂礫層）を取り出して表示すると、図-6のように表示することができる。同図より、白線で示す堤体の中で、中央部付近が砂礫、砂といった非粘性土でできていることがわかる。

次に、 $900\Omega\text{m}$ 以下の領域（非砂質土；中間土の一部と粘性土）を取り出して表示すると、図-7のように表示することができる。木曾川堤防は、表層部と底部については細粒分を多く含有

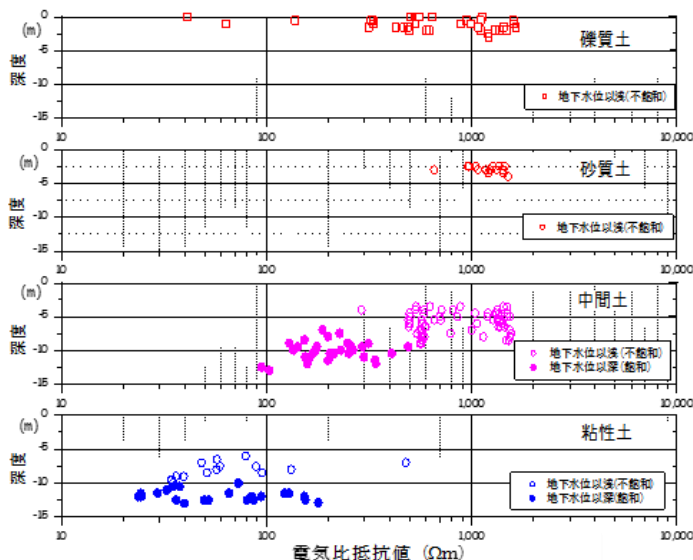


図-5 統合型貫入試験によって求めた木曾川堤防の土質と電気比抵抗値の関係

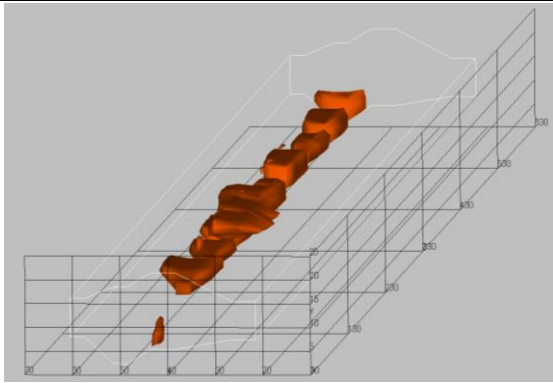


図-6 木曽川堤防三次元土質モデルによる堤体内の砂礫・砂層の分布状況

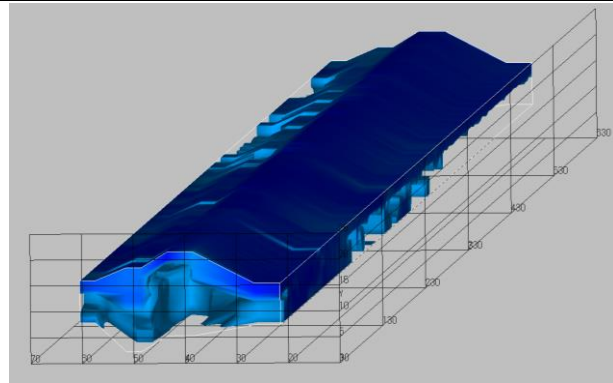


図-7 木曽川堤防三次元土質モデルによる堤体内の粘性土の分布状況

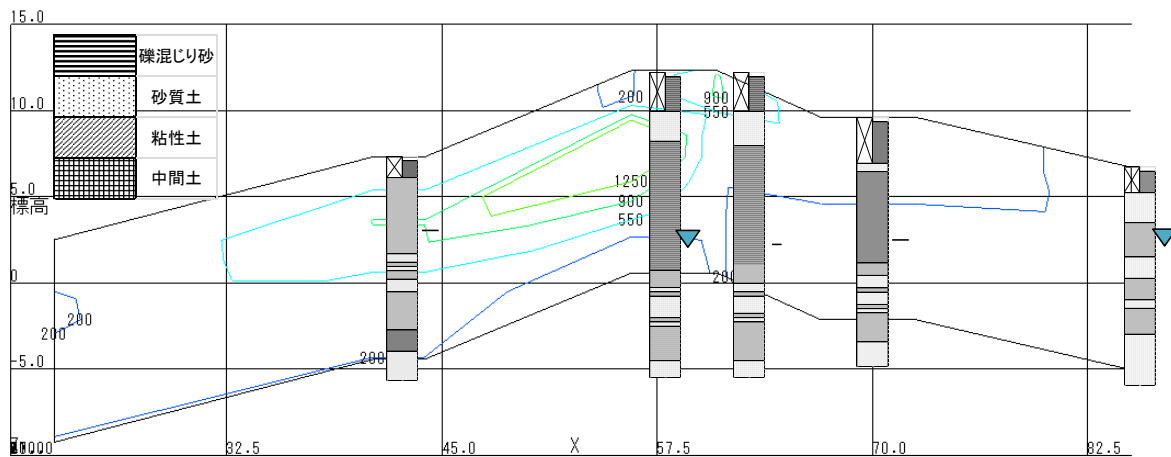


図-8 木曽川代表断面における三次元土質モデルと土質柱状図による土質区分の比較

する非砂質土系の土質から成っていることがわかる。

図-8に提案手法で求めた三次元モデルを切り出した断面に、統合型貫入試験によって得られた土質柱状図を合わせて示す。堤体直下の高比抵抗値域に砂層と中間土層が認められ、表層部、底部の低比抵抗帯には中間土～粘性土層が対応しており、提案手法によって構築した地盤モデルは実地盤をうまく再現できている。

5. おわりに

作業性に優れた牽引式電気探査と統合型貫入試験を合わせて実施することによって、線状構造物である堤防の三次元土質モデルを構築する手法を開発、提案した。堤防縦断方向に堤防を包含する複数測線を選定し、堤防を縦断に切るようなパネル型の電気比抵抗値データを作成し、パネル間を線形補間することで三次元化を図った。さらに、統合型貫入試験によって、点情報としての一次元土質モデルを作成し、合わせて電気比抵抗値と土質区分の関係を求めることにより、電気比抵抗値モデルを土質モデルに変換することができる。また得られたモデルは実地盤を再現できることがわかった。

実用化に向けては、牽引式電気探査による表層近傍の測定精度の向上（機械的な問題を解決）、測線間の電気比抵抗の補間手法の改善（台形構造の場合、堤頂部にいくにしたがって側方領域がなくなるので、補間精度が悪くなる）など、解析作業に係わる技術的課題が残されている。

参考文献

- 1) 杉井俊夫, 佐古俊介: 河川堤防 4. 浸透破壊に対する評価・対策, 地盤工学会誌, pp.63-64, 2013.
- 2) 小西千里, 林 宏一, 阿部知之, 田中敏彦: 河川堤防における非破壊調査手法の研究—非破壊調査手法の検討と物理探査の適用—, 応用地質技術年報, No.26, pp.19-43, 2006
- 3) Campanella, R.G and Weemes, I.: Development and use of an electrical resistivity cone for groundwater contamination studies, Canadian Geotechnical Journal, Vol.27, No5, pp.557-567, 1990.

⑦研究成果の発表状況

2014年度：

- ①三村 衛, 岩崎好規, 中川康一, 吉村 貢, 城森 明：河川堤防の電気探査と土質特性, 情報地質 2014 Vol.25, №2, pp.78-81, 2014.6
- ②宮下隆太郎, 三村 衛, 吉村 貢, 岩崎好規：統合型貫入試験による河川堤防土質モデル構築に関する基礎的研究, 第 49 回 地盤工学研究発表会 講演集, pp.215-216, 2014.7
- ③三村 衛, 宮下隆太郎, 岩崎好規, 吉村 貢, 城森 明：河川堤防の土質断面モデル作成手法に関する可能性と問題点 — 電磁気探査と統合型コーン貫入試験の適用 —, 第 49 回 地盤工学研究発表会 講演集, pp.217-218, 2014.7
- ④三村 衛, 岩崎好規, 吉村 貢：電気比抵抗コーンによる河川堤防地盤の電気比抵抗特性の検証, 土木学会第 69 回年次学術講演会 講演集, pp.375-376, 2014.9
- ⑤宮下隆太郎, 三村 衛, 吉村 貢, 岩崎好規：統合型貫入試験による木津川河川堤防土質モデル構築に関する基礎的研究, 土木学会第 69 回年次学術講演会 講演集, pp.377-378, 2014.9
- ⑥三村 衛, 岩崎好規, 中川康一, 城森 明, 吉村 貢, 藤原照幸：河川堤防の電気探査と地盤特性, 第 131 回物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.59-62, 2014.10

2015年度：

- ⑦宇野匡範, 三村 衛, 矢野隆夫, 吉村 貢：電気比抵抗測定装置の開発と地盤材料への適用に関する基礎的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会, III-24, 2015.5
- ⑧三村 衛, 岩崎好規, 中川康一, 城森 明, 吉村 貢, 藤原照幸：河川堤防の電気探査と地盤特性 (2), 第 133 回物理探査学会学術講演会講演論文集, pp.31-34, 2015.9
- ⑨宇野匡範, 三村 衛, 矢野隆夫, 吉村 貢：電気比抵抗測定装置の開発と河川砂を用いた基礎的実験, 第 50 回 地盤工学:研究発表会 講演集, pp.179-180, 2015.9
- ⑩藤原照幸, 岩崎好規, 三村 衛, 宮下隆太郎, 吉村 貢, 城森 明：河川堤防の土質断面モデル構築に関する研究 —電気探査結果に基づく地盤構成の推定について—, 第 50 回 地盤工学:研究発表会 講演集, pp.221-222, 2015.9
- ⑪三村 衛, 岩崎好規, 藤原照幸, 吉村 貢, 松浦良信：電気比抵抗コーン貫入試験による土層区分, 第 50 回 地盤工学:研究発表会 講演集, pp.177-178, 2015.9
- ⑫三村 衛, 岩崎好規, 藤原照幸, 吉村 貢, 吉留花江：R I コーン貫入試験による堤体の土層構造調査の一例, 第 50 回 地盤工学:研究発表会 講演集, pp.213-214, 2015.9
- ⑬三村 衛, 宇野匡範, 岩崎好規, 吉村 貢：電気比抵抗コーンによる河川堤防地盤の電気比抵抗の深度分布, 土木学会第 70 回年次学術講演会 講演集, pp.519-520, 2015.9
- ⑭M.Mimura, Y.Iwasaki, K.Nakamura, A.Jomori, M.Yoshimura, T.Fujiwara, and M.Uno : A case study of soil type identification for levee structure by electric survey with unified cone field test, Proc. 12th International Symposium Geophysical Imaging and Interpretation, Session-7, Paper No. S7-3, 2015.11

2016年度：

- ⑮三村 衛, 岩崎好規, 藤原照幸, 吉村 貢, 松浦良信：R I コーン貫入試験による有機質土層の検出, 第 51 回 地盤工学:研究発表会 講演集, (投稿中), 2016.9
- ⑯三村 衛, 岩崎好規, 藤原照幸, 吉村 貢, 重富正幸：泡充填による貫入孔の電気比抵抗に関する一考察, 第 51 回 地盤工学:研究発表会 講演集, (投稿中), 2016.9
- ⑰藤原照幸, 岩崎好規, 三村 衛, 宮下隆太郎, 吉村 貢, 城森 明：牽引式電気探査と統合型コーン貫入試験結果による河川堤防の土層構造推定について, 第 51 回 地盤工学:研究発表会 講演集, (投稿中), 2016.9
- ⑱宮下隆太郎, 三村 衛, 吉村 貢, 岩崎好規, 藤原照幸：牽引式電気探査と統合型 CPT による堤体三次元地盤モデルの構築に関する研究, 第 51 回 地盤工学:研究発表会 講演集, (投稿中), 2016.9
- ⑲三村 衛, 岩崎好規, 藤原照幸, 吉村 貢：信濃川堤防の自然ガンマ線強度と地盤材料に関する一考察, 土木学会第 71 回年次学術講演会 講演集, (投稿中), 2016.9

⑧研究成果の社会への情報発信

(ウェブ、マスメディア、公開イベント等による研究成果の情報発信について記入下さい。ウェブについてはURL、新聞掲載は新聞名、掲載日等、公開イベントは実施日、テーマ、参加者数等を記入下さい。)

・特にありません

⑨表彰、受領歴

(単なる成果発表は⑦⑧に記載して下さい。大臣賞、学会等の技術開発賞、優秀賞等を記入下さい。)

・特にありません

⑩研究の今後の課題・展望等

(研究目的の達成状況や得られた研究成果を踏まえ、研究の更なる発展や道路政策の質の向上への貢献等に向けた、研究の今後の課題・展望等を具体的に記入下さい。)

3カ年の技術開発研究を通じて、電気探査による電気比抵抗値が、土の鉱物組成、含水比（飽和度と言い換えてもよい）、間隙水の種類（塩水の影響が最も大きい）などによって変動することが確認できた。各堤防で探査を行うにあたり、電気比抵抗値の絶対値を用いて堤防構造評価を行う場合には、調査区間の土質と電気比抵抗値の関係を予め捉えておくことが必要である。また、統合型貫入試験によって測定される湿潤密度と含水比の値から地盤の飽和度を求めることができる点は非常に有利である。これは従来広く行われているボーリングベースの調査では得られない情報であり、作業価格以上に重要なファクターと考えるべきである。三次元堤防断面土質モデルの構築手法は提案できたが、土質区分～電気比抵抗値関係から求める土質境界の電気比抵抗値の精度は、データの数に依存するため、統合型貫入試験は十分な本数が必要となる。経費との関係などを明確にし、適切な本数についての検討は今後の課題となる。こうした問題点は残すものの、機動性に富んだ牽引式電気探査による効率的な電気比抵抗値測定と、高精度に土質判定ができ、深さ方向に電気比抵抗値がわかる統合型貫入試験を組み合わせることによって、実用可能な堤防の三次元土質断面モデル作成手法を開発できたものと考えている。

⑪研究成果の河川砂防行政への反映

(本研究で得られた研究成果の実務への反映等、河川政策の質の向上への貢献について具体的かつ明確に記入下さい。)

線状構造物である堤防を安全に保つためには、脆弱箇所の探知が求められる。本研究で活用した統合型貫入試験は、一般的に行われる標準貫入試験型の地盤調査に比べて、パイピングを誘発するような高透水層や強度に著しい問題をもつ有機質土層を、それらがたとえ10cm程度の薄層であっても捉えることができる。また、堤防横断方向に複数実施するスペックになっており、水平方向への連続性についても把握することができ、河川堤防の安全性評価に関わる堤体構造情報の高品質化に資するデータを提供することができる。

牽引式電気探査を用いることによって、長い距離の測定が比較的短時間のうちに効率的に堤体の電気比抵抗分布を測定することができる。三次元化を行うために、縦断方向に堤防をカバーできる複数測線における測定が必要となるが、従来法に比べて機動的に測定できるため、実務においても実施可能なレベルになったと考えられる。これにより、堤体全体の三次元電気比抵抗構造が把握することによって堤防構造を三次元的に評価できることから、河川砂防行政に資する情報を提供しうるものと考えられる。