

高密度電気探査法による堤防調査技術の開発動向

三木博史* 古田光弘** 古本一司***

1. はじめに

河川堤防は、洪水から地域住民の生命・資産を守るために築かれた重要な防災構造物の一つである。しかしながらその多くは、長い治水の歴史の中で嵩上げ（既設堤防上にさらに盛土を行い堤防高を上げる）などが繰返し行われて現在の形に至っていることが多い。このため築堤に用いられた土質材料や締固め密度などが施工時期や施工方法によって異なり、内部構造は複雑で変化に富んだものとなっている。

また、堤体下の基礎地盤についても過去の河道の変遷などのために極めて複雑な土質構成となっており、その正確な把握は一般的に難しい。

近年、氾濫原における人口や資産の集中傾向が高くなるにつれ、堤防の安全性に対する要請がますます強くなっている。

以上のような背景から、堤防強化を行うにあたっては、現状の堤防の内部構造を知り、強化対策が必要な箇所の抽出と、適切な強化対策を合理的に選定することが重要となる。

堤防の内部構造を調べるには、通常、開削やボーリング調査が行われている。しかし、ボーリング調査の場合、点の情報しか得られない、開削の場合費用や時間がかかるなどの問題点を含んでいる。そのため、連続的な情報を比較的安価に得ることのできる、非破壊で一定の精度を有する堤防内部構造探査技術の必要性が高まってきている。

そこで、新しい堤防調査技術の一つとして、高密度電気探査法を取りあげた。高密度電気探査法は、対象とする堤防の表面に設置した電極から地局に直接電流を流し、そのとき測定された電位差を逆解析することで、堤防の比抵抗断面図を得る技術である。この比抵抗断面図と、確認ボーリングなどを組み合わせることにより、堤体を乱すことなく土質構造を迅速かつ的確に推測することができる。

本報告では、同探査法の堤防土質探査への適用性を明らかにするために行った現地試験調査の結果、および同探査法を用いた堤防内部構造評価手法について紹介するものである。

2. 高密度電気探査法の堤防探査への適用性について

先に述べたように、堤体と基礎地盤の組み合わせは多岐にわたっており、その複雑さが堤防の浸透流などに対する安定性を定量的に評価することを困難なものにしている。

例えば、堤防縦断方向の構造変化について、ボーリングやサウンディングなどの土質調査からある程度推測することは可能であるが、調査対象区間内の構造を面的にかつ的確に把握するためには相当数の調査を実施する必要がある。

一方、高密度電気探査法は、調査対象区間の連続した土質情報が得られる。このため弱点となりやすい水みちのある箇所などを把握しやすい。この際、確認のためのボーリングを組み合わせること

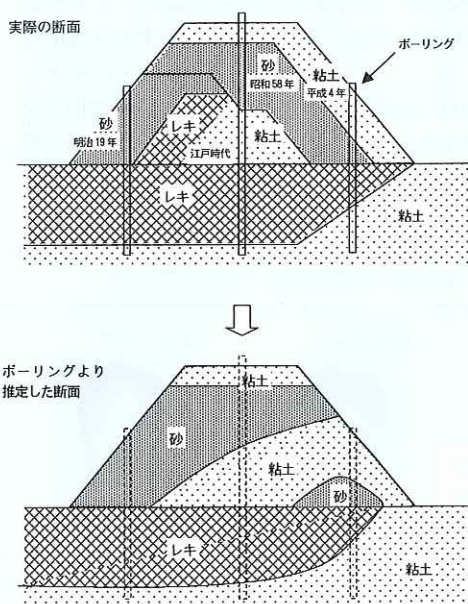


図-1 土質構造の推定と誤認

によって、探査精度はさらに向上すると考えられる。

また、横断方向についても、調査結果から断面図を作成し、安定度評価に利用されるなど重要性が高い。一般的にはボーリングやサウンディングなどにより推測されているが、図-1に示すように、堤体構成が複雑な場合、構造を誤認するおそれがある。ここで、高密度電気探査法を用いることにより、面的な把握が可能となる。

3. 現地試験調査概要および結果

本手法による河川堤防の内部土質構造探査の可能性が室内模型試験などによりある程度確認できたので¹⁾、より現実的な適用を目的として現場試験調査を行った。具体的な項目は、次の通りである。

- (1) まず、堤防縦断方向探査を行うことにより、探査対象区間の基礎地盤内で安定度の低い部位を発見する。
- (2) 発見された安定度の低い部位について横断探査、および確認ボーリング調査を行い、詳細な堤防断面を作成する。

なお、具体的な高密度電気探査の測定システムについては後述する。

3.1 堤防縦断方向探査概要および結果

図-2に縦断測線配置を示す。図に示すように縦断方向については、延長 800m の区間を対象として行った。現場には河川を横断する鉄道や道路がある。今回の調査では、特に基礎地盤について安定度の低い部位を発見する目的で、測線はのり尻に 178 本配置した。また電極間隔を 5.0m と広めに設定した。

電極には金属棒電極を用いた。また電極配置は、ウェンナー法に比べ内部土質構造との対応性のよい

ダイポール・ダイポール法とした。これらの手法の詳細については参考文献²⁾を参照されたい。

さらに、実際の土質構造と、高密度電気探査法により得られる比抵抗分布の相関性を確認するためにボーリングを 5 カ所で実施した。

測定により得られた基礎地盤の比抵抗分布を図-3に、またボーリングによって得られた土質柱状図を図-4に示す。両図から以下のことが明らかになった。

- (1) 土質柱状図(図-4)によると、基礎地盤全体の傾向として、表層から 8m 程度まではレキおよび砂が、8m から 20m まではシルトおよび砂などが主に分布していることがわかる。一方、比抵抗分布図(図-3)をみると、3m 程度までに $300\Omega\cdot\text{m}$ を超える高比抵抗領域、8m からは 20m 程度までは $100\Omega\cdot\text{m}$ を下回る低比抵抗領域の分布がみられる。比抵抗値については一般に次のように解釈される。比抵抗値は含水比や間隙率などの影響を受け、土質分類のみにより決定されるものでないが、一般に粘土は相対的に低比抵抗を示し、浸透に対して危険とされる砂質土や緩んだ部分などは、高比抵抗を示す。高比抵抗領域をレキ・砂層領域、低比抵抗領域をシルト質層と考えると、土質柱状図と比抵抗分布図は比較的良好な整合があるといえる。
- (2) 縦断方向には、探査始点から 400m 地点付近と 600m 地点付近に $300\Omega\cdot\text{m}$ を超える高比抵抗領域が基礎地盤表面付近に広く分布していることから、旧河道に起因する河床レキの存在が予測された。このことは土質柱状図(ボーリング No.2)により確認された。また、280m 地点付近には高比抵抗領域の切れ目がみられ、透水性が低いことが予想されたが、土質柱状図(ボーリング No.1)からもレキが発見されなかった。

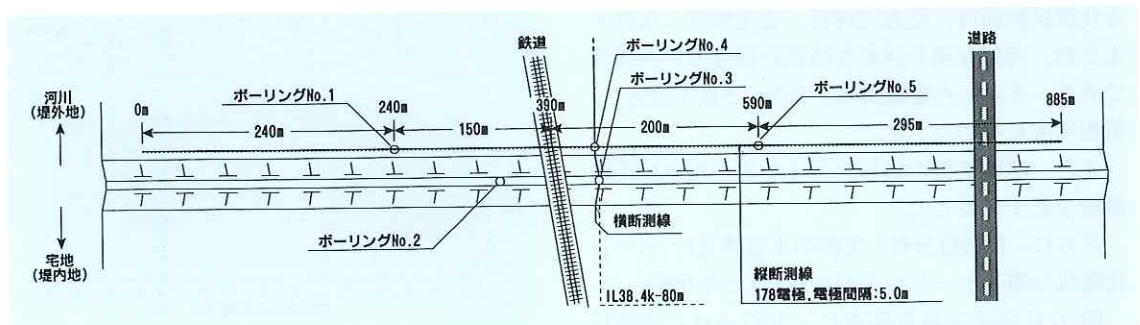


図-2 縦断測線配置

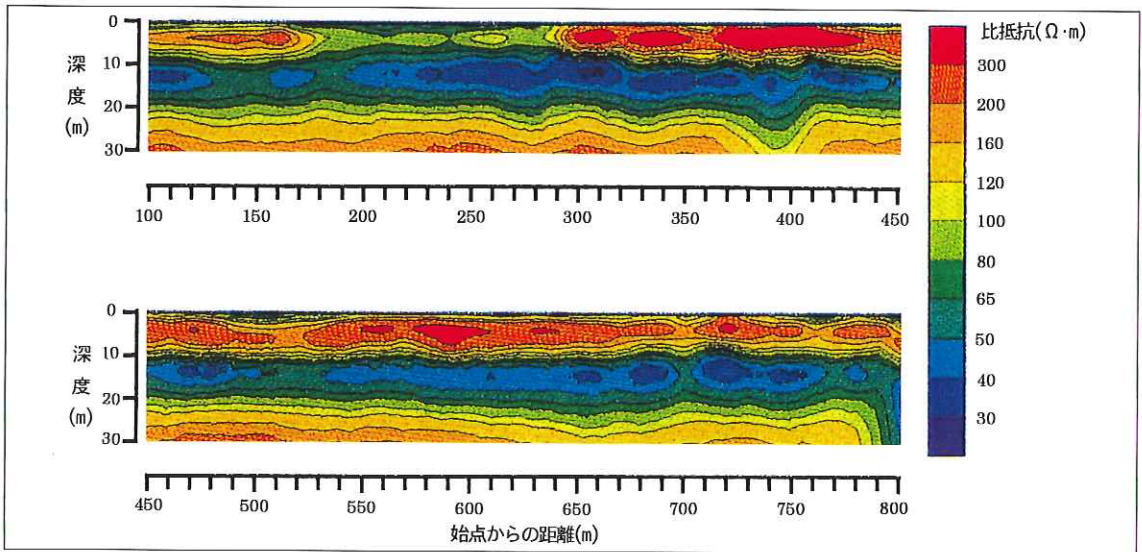


図-3 縦断方向の比抵抗分布

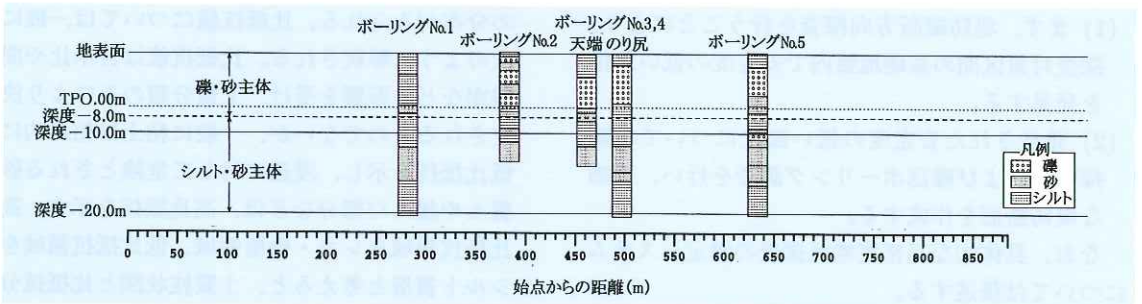


図-4 土質柱状図

したがって、両者の相関性は高いと考えられる。

以上の探査結果より、河床レキが存在し弱点と考えられる 400m 地点付近を横断方向探査対象箇所とした。ただし、実際には当該箇所は堤防上を通過する鉄道等の関係で十分な延長の測線を配置することが難しかったため、440m 付近に横断測線を配置した。

3.2 堤防横断方向探査概要および結果

図-5 に横断測線配置を示す。探査により得られる比抵抗断面は、浸透流解析、安定解析に反映するため、可能な限り詳細な情報を得ることが必要である。そのため電極間隔を 2.0m と狭く設定し、情報密度を高めた。

また、基礎地盤の情報を得るため、堤外地側に測線を若干延長した。

さらに、比抵抗分布と実際の土質構造について、比抵抗分布とボーリング (No.3, 4) とを比較した。

図-6 に高密度電気探査により得られた比抵抗分布とあわせて土質柱状図を示す。図より以下の

ことが明らかになった。

- (1) 堤防中央付近の土質構造について、ボーリング No.3 の土質柱状図によれば、堤頂～標高+10.5m 程度までシルト混じり砂レキ、標高+10.5m～+4.0m 程度までシルト、標高+4.0m～±0.0m 程度まで砂レキの分布がみられる。

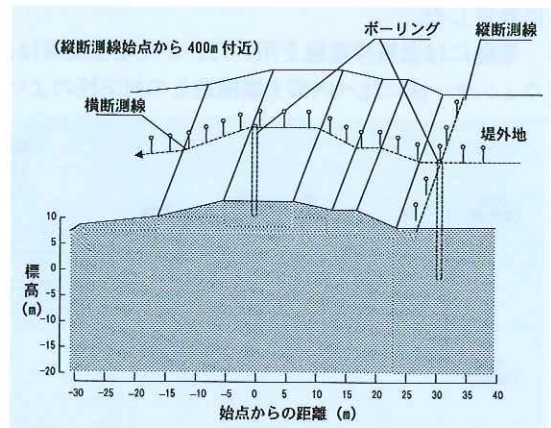


図-5 横断測線配置図

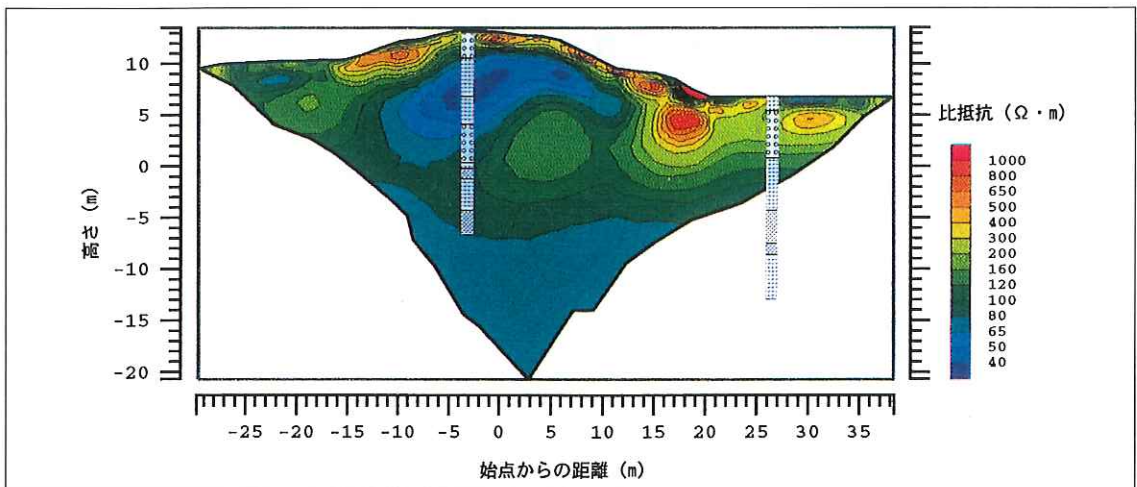


図-6 比抵抗分布図および土質柱状図

一方、比抵抗分布図においては、堤頂～標高+10.5m程度に200 Ω ・m以上の高比抵抗領域、標高+10.5m～+4.0m程度に80 Ω ・m以下の低比抵抗領域、標高+4.0m～±0.0m程度に80～200 Ω ・mの領域の分布がみられた。したがって、高比抵抗領域をシルト混じり砂レキ層、低比抵抗領域をシルト層と考えると、ボーリングによる土質柱状図と比抵抗値の間には高い相関性があると考えられる。

堤外地側の基礎地盤についても、土質柱状図(ボーリングNo.4)および比抵抗分布図より、基礎地盤表層から1.5m程度までのシルト質層を低比抵抗領域、1.5m以深での砂レキ層を高比抵抗領域として判読することができる。

- (2) 堤防断面推測にあたり、標高±0.0m以深に関しては、ボーリングによる土質柱状図により、土層構造を推定した。これは、高密度電気探査法の探査特性により、深部での精度が落ちること、その一方で複数行ったボーリング結果が標高±0.0m以深において一様の傾向を示しており、信頼性が高いと考えられたためである。柱状図によれば、標高±0.0m～-4.7mまでにシルト、標高-4.7m～-9.2mまでに細砂、標高-9.2m以深にシルト層があることが推定された。
- (3) 堤外地側のり尻表層付近に高比抵抗部の存在がみられるが、これは、コンクリート護岸の影響であると考えられる。

以上の結果から、堤防断面の内部構造を推定したものを図-7に示す。図に示すように、堤外地

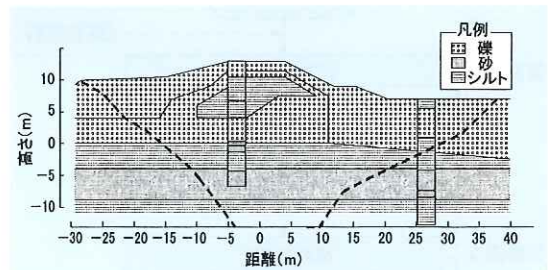


図-7 断面推測図

側から堤内地にかけて、標高+5.0mから±0.0mの間にはレキが存在し、浸透に対しては安定度の低い箇所であると考えられる。

3.3 まとめ

高密度電気探査法の実践的な適用を考慮して、試験調査を行った結果、以下のことが明らかになった。

- (1) 縦断探査により、探査対象延長の中で安定度の低い部位を発見することは可能であった。これは、探査の結果、所々に高比抵抗領域が発見されたため確認ボーリングを実施したところ、高比抵抗領域にはレキの存在が確認され、逆に高比抵抗領域の切れ目にはレキが発見されないなど、ボーリング調査結果と、比抵抗分布は非常に整合性が高いことが確認されたことによる。
- (2) 高密度電気探査による横断探査および確認ボーリング調査を組み合わせることにより、詳細な堤防断面の推測が可能であることが確認された。
- (3) 縦断探査と横断探査を組み合わせることにより、効率的に弱点箇所を把握することが可能である。

4. 高密度電気探査法を用いた堤防内部土質構造評価手法

4.1 全体の流れ

堤防内部構造調査のための高密度電気探査法の流れを、図-8 に示す。

図-8 に示すように、本手法ではまず、調査対象区間を縦断方向に高密度電気探査することにより堤防の土質縦断面構造を長区間にわたって調査する。次にその結果に基づいて、代表的な箇所あるいは弱点箇所と判定される地点で横断方向の高密度電気探査と確認ボーリング調査を実施する。以上の結果を総合して堤防内部構造を推定する。

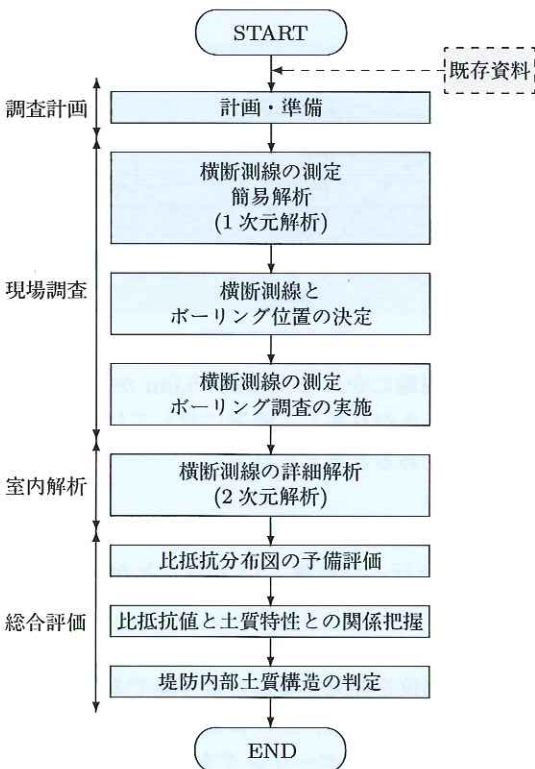


図-8 堤防内部構造調査のための高密度電気探査法のフロー

なお、詳細については、後述の文献²⁾を参照されたい。

4.2 実施にあたっての留意点

高密度電気探査の実施にあたっては、現地踏査により、必要な測線長確保の可能性、電氣的ノイズや堤防天端の舗装状況などの測定環境、植生・湧水の有無などを確認する。

次に縦断方向の高密度電気探査測線、およびボーリング調査地点を設定する。また、横断測線については、現地踏査段階で水の浸潤などの異常が認められた場合にはその箇所とし、それ以外の

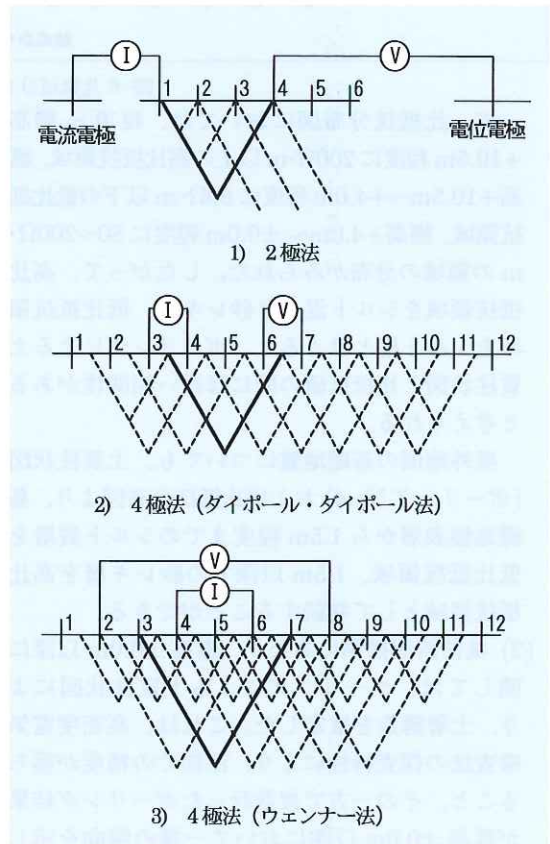


図-9 電極配置の概要

表-1 各電極配置の相対評価

電極配置	土構造との対応性	安全性 ¹⁾	作業性	難易度 ²⁾
4極法: ダイポール・ダイポール法	良好	安全	良好	普通
4極法: ウェンナー法	普通	安全	良好	普通
2極法	普通	要注意	普通	易

1) 高密度電気探査では測定中に電流を流すため、電流電極を作業者および第三者が触れないように十分に注意し、安全を確保することが必須である。速電極が必要な2極法より不要な4極法の方が安全管理が容易である。

2) 一般的に、測定する電位差が大きいくほど測定が容易である。4極法の場合、測定電位差が小さく、測定の難易度は高くなるが、堤防のような場合、探査深度が小さいこと、比抵抗計の測定精度を向上させることにより、十分な精度のデータを得ることができる。

場合は、縦断探査結果で高比抵抗値を示すなどの異常箇所が検出された箇所とする。

電極の配置方法としては、2極法と4極法がある。2極法は地表に設置した一対の電流電極から、直流電流を流し、別の一対の電位電極の間の電位差を測定する。探査深度は図-9に示すような正三角形の頂点になる。一方4極法では、図-9に示すように、2極法のような遠電極を必要としない。探査深度はダイポール・ダイポール法、ウェンナー法でそれぞれ図-9に示すようになる。表-1に示すように、4極法(ダイポール・ダイポール法、ウェンナー法など)が、測定精度や安全性の点で優れており、電氣的ノイズが高い場合などを除いては、4極法が望ましい。

また、計測作業や測定データに影響を与える要因には、(1)絶縁体・高比抵抗構造物(アスファルト舗装、コンクリート)、(2)産業設備からの漏洩電流(高圧送電線)、(3)低比抵抗構造物(ガードレール、埋設管)、(4)その他(水位、開削部など)、がある。これらが存在する場合は、解析・解釈の段階で評価できるよう、計測時の品質管理などで影響度合いを把握しておく必要がある。

4.3 既設堤防の内部構造の判定

高密度電気探査法により求められた比抵抗断面図は、堤防内部の土質構造をその電気抵抗の置き換えにより間接的に表現するものである。しかしながら、比抵抗は堤防の築堤材料や基礎地盤の電氣的な特性を反映しているものであるため、土質材料の含水比などの影響を受けやすく、例えば砂質土であっても含水比が高い場合には小さな比抵抗を示し、粘性土との判別が困難になる場合が生じる。従って、高密度電気探査に加え、少なくとも

も1本のボーリング調査を実施し、ボーリング地点での比抵抗と土質材料の対比を行い、堤防の土質構造断面を判定する必要がある。

5. あとがき

堤防内部土質構造に対する高密度電気探査法の適用性を評価するため、検証試験を実施し、その結果土質構造の把握に有効であることが確認された。さらに、高密度電気探査法を用いた堤防内部土質構造調査手法を提案し、本稿では、その概要を示した。

ただし、比抵抗値は土質材料の含水比などの影響を受けやすく判別が難しい場合がある、などの問題点があり、改良していく必要がある。

今後はさらに、精度の向上を図るとともに、現場への適用を積み重ねていきたいと考えている。

なお、本報告で紹介した内容は、建設省土木研究所と中央開発(株)、(株)ダイヤコンサルタント、(株)建設技術研究所との共同研究の一環として行われたものであり、関係者のご努力に対し、この場を借りて心から謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 三木博史、持丸章治、野口典孝：高密度電気探査法を用いた堤体の探査技術の開発、土木技術資料 38-8, pp.62-67, 平成6年8月
- 2) 建設省土木研究所材料施工部土質研究室、中央開発(株)、(株)ダイヤコンサルタント、(株)建設技術研究所：高密度電気探査手法による堤防内部構造探査手法に関する共同研究報告書、共同研究報告書第193号、平成10年3月

三木博史*



建設省土木研究所材料施工部
新材料開発研究官、工博
Dr.Hiroshi MIKI

古田光弘**



建設省関東地方建設局
首都国道工事事務所
調査第一課
(前 土質研究室研究員)
Mitsuhiro FURUTA

古本一司***



建設省土木研究所材料施工部
土質研究室研究員
Kazushi FURUMOTO