

河川堤防における非破壊調査手法の研究

－開削調査による物理探査手法の適用性検証－

田中 敏彦・阿部 知之・林 宏一・小西 千里

A study of nondestructive investigation methods for a levee

- Applicability evaluation of geophysical methods in terms of levee excavation -

Toshihiko Tanaka, Tomoyuki Abe, Koichi Hayashi and Chisato Konishi

Abstract

Estimating internal material of the body and foundation of levee is very important for levee assessment. The total length of the existing levee is, however, too long to carry out conventional geotechnical investigations and demand for effective and low-cost investigation methods is increasing. In order to develop effective nondestructive investigation methods for the levee assessment, we have conducted comparative study using several geophysical methods along the Kuwano River in Tokushima prefecture in 2005. In order to evaluate the accuracy and reliability of nondestructive investigation methods, levee excavations have been carried out in 2007. During the excavations, we have performed several geotechnical and geophysical tests at the excavated levee body and foundation. This paper compares the result of excavations with the result of nondestructive investigations and evaluates the applicability of nondestructive investigations. In conclusion, joint interpretation of a capacitive-coupled resistivity system and a surface-wave method can delineate the soil type of body and foundation of levee continuously along a river.

Keywords: levee, nondestructive investigation, geophysical method, shear wave velocity, resistivity.

(要 旨)

河川堤防の安全性評価においては、堤体や基礎地盤の土質等の地盤情報を的確に把握することが重要であるが、対象とする堤防の延長距離が長いことから、効率的かつ低コストの調査手法の開発が求められている。筆者らは河川堤防における効率的な調査手法の開発を目的として、平成17年に徳島県の桑野川堤防において各種非破壊調査手法の適用性に関する比較調査を実施した。その後、平成19年に同堤防では探査結果の検証を目的として開削調査が行われたため、開削箇所での堤体や基礎地盤において土質調査や物理探査を行った。本論文では、非破壊調査結果と開削調査結果を比較検討し、非破壊調査手法の河川堤防調査への適用性について検証する。検証の結果、牽引式電気探査と表面波探査を組み合わせた調査により、堤体および基礎地盤の縦断方向の土質分布の概略を把握することが可能であることがわかった。

キーワード：河川堤防, 非破壊調査, 物理探査, S波速度, 比抵抗

1. はじめに

河川堤防は延長が長大であることから、堤防沿いには様々な地形が分布しており、それに伴い基礎地盤を構成する土質や土層構成は場所により複雑に変化している。また、堤体は洪水災害の歴史とともに改修による嵩上げや拡幅が行われてきたことから、内部の土質構造や土質特性は多様かつ複雑な場合が多い。

河川堤防の安全性は、基礎地盤の土質や堤体の土質によって大きく左右されることから、安全性評価にあたってはこれらの状況を十分に把握することが重要となる。

現在進められている河川堤防の浸透に対する安全性の詳細点検では、延長の長い河川堤防の安全性評価を効率的に進めるために、河道特性や微地形、地盤情報、被災履歴等の基礎資料をもとに対象区間を細分した後に、細分した区間ごとに代表断面を選定して、ボーリングを基本とする詳細調査が実施されている。対象区間の細分や代表断面の設定に際しては、堤体の土質や基礎地盤の土質などが重要な情報となるが、数少ないボーリング資料等をもとに判断する必要があり、これらを適切に行うことが困難な場合が多い。そのため、非破壊調査の適用性が向上し、ボーリング等による点の情報に補完することが可能になれば、上述した詳細点検がより効率的かつ適切に行われるようになることが期待される。このようなことから近年、非破壊調査手法として物理探査を河川堤防調査に適用する研究が進んでいる¹⁾²⁾³⁾。

本研究は、河川堤防の土質調査に対する適用性の高い非破壊調査手法を開発することを目的としている。近年筆者らは、広い領域を効率よく探査できる物理探査手法として、表面波探査⁴⁾や牽引式電気探査⁵⁾を開発・導入してきた。これらの新しい調査手法は、多くの実際の堤防調

査に適用されるようになってきた⁶⁾⁷⁾。

昨年発表した論文⁸⁾では、平成17年に実施した徳島県阿南市的那賀川の支流の桑野川左岸堤防の6k～7k800を対象とした各種非破壊調査手法による調査結果の比較・評価を行い、牽引式電気探査と表面波探査を組み合わせた新たな調査法の提案について述べた。その後、同堤防では探査結果の検証を目的として平成19年に6k400～800の区間で6箇所の開削調査が行われたため、開削箇所での堤体や基礎地盤において土質調査や物理探査を行い非破壊調査手法の適用性を検証した。本論文では、まず開削前に行った非破壊調査の結果をまとめ、次に開削箇所で行った土質調査や物理探査の結果を示し、最後に非破壊調査結果と開削調査結果を検証し非破壊調査手法の河川堤防調査への適用性を評価する。

2. 桑野川堤防における非破壊調査の概要

2.1 調査箇所

桑野川堤防において平成17年に非破壊調査を行った区間は、図-1に示す距離標6k～7k800の区間である。この区間では図-2に示すように、アスファルト舗装した堤防天端上と、堤内側と堤外側の堤防法尻の合計3本の縦断方向の測線を設け複数の物理探査を実施した。

2.2 調査方法

桑野川で適用した物理探査手法は、牽引式電気探査(オームマップパー)、従来の直流電気探査(ダイポール・ダイポール法)、電磁探査(GEM300)、ランドストリーマー⁹⁾を



図-1 調査位置図 (2003 那賀川管内図に加筆)

Fig.1 Location of survey line and excavation area.

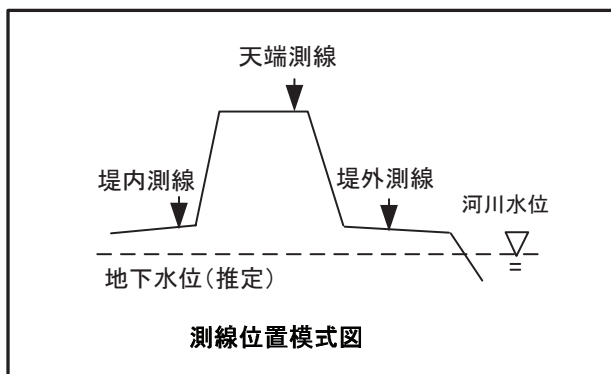


図-2 調査測線位置模式図(断面図)

Fig. 2 Schematic view of survey line (cross section).

用いた表面波探査¹⁰⁾である。電気探査と電磁探査は、地盤の比抵抗分布から堤体と基礎地盤の土質分布を推定することを目的として実施した。表面波探査は、地盤のS波速度分布から堤体と基礎地盤の土質分布、および地盤の強度分布を推定することを目的として実施した。

牽引式電気探査⁵⁾は、従来の電気探査のように電極棒を打設する必要がないため作業効率が高らかに優れているという特長があり、堤防調査のような長大測線で最も効果的な手法と期待されている。ただし適用事例がそれほど多くないため、測線の一部の区間において従来の電気探査(ダイポール・ダイポール法)を同一測線で実施し、従来の電気探査結果との比較を行った。その結果、牽引式電気探査により従来の電気探査とほぼ同じ比抵抗構造が得られたため、全測線で測定を行った。

本調査では、従来のように1種類の物理探査結果を解釈するだけでなく、複数の物理探査結果から堤体および基礎地盤の評価を行うことを試みた。牽引式電気探査

で得られる比抵抗値は地盤の土質構成を反映し、表面波探査で得られるS波速度は地盤の締固め度を反映していると考えられるので、2つの物性のクロスプロットを用いて堤体および基礎地盤の土質と締固め度を推定した。このように、複数の物理探査を統合的に用いる調査手法は近年注目されており、特に電気探査や電磁探査と表面波探査の堤防調査への適用については盛んに研究されている^{10) 11) 12)}。

2.3 調査結果

縦断方向の非破壊調査結果について、開削調査が行われた6k350～6k850の区間について、堤体と基礎地盤に分けて簡単にまとめる。全区間の非破壊調査結果は、昨年報告した論文⁸⁾にまとめてある。

(1) 堤体の土質評価結果

堤体内のS波速度と比抵抗のデータ(6k350～6k850m)のクロスプロットを図-3に示す。用いたデータは、天端測線で実施した表面波探査結果の深度3.5mまでの平均S波速度と、牽引式電気探査結果の深度3.8mまでの平均比抵抗値である。比抵抗データの最大値は340ohm-m程度であり、礫質土と考えるには比抵抗の値がやや小さいと判断した。そのため、境界値を110ohm-mとして、粘性土と砂質土に土質を区分した。砂質土の中には、粘性土と判断した部分よりも小さなS波速度を示す部分がみられた。このような部分は砂質でかつ緩んだ堤体部と判断でき、堤体の安全性を考えた場合には要注意箇所と考えられる。逆に、砂質土の中でもS波速度が特に大きい部分も見られた。このような部分は、その場所だけでは良く締まった堤防と判断できるが、緩んだ部分と

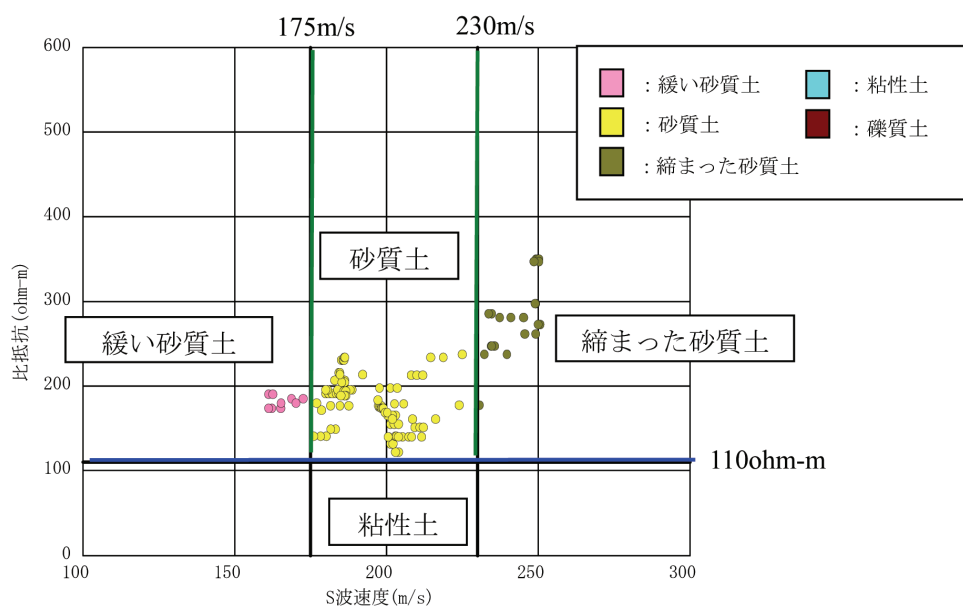


図-3 S波速度と比抵抗値のクロスプロット(天端測線)と開削前の土質区分

Fig. 3 Cross plot of S-wave velocity and resistivity with initial soil type interpretation for levee body.

隣あう位置にあれば、境界部分が逆に弱くなることも考えられる。このような考えのもとで、砂質土と判断した部分から、境界値を 175m/s と 230m/s としてさらに土質を区分した。これらの S 波速度値は、今井の式によればそれぞれ N 値が 6 と 15 程度に相当する値である。

図-4に、土質区分に用いた表面波探査と牽引式電気探査の結果、および土質区分結果を示す。

(2) 基礎地盤(堤外側)の土質評価
堤外側基礎地盤の表層部分の S 波速度と比抵抗の

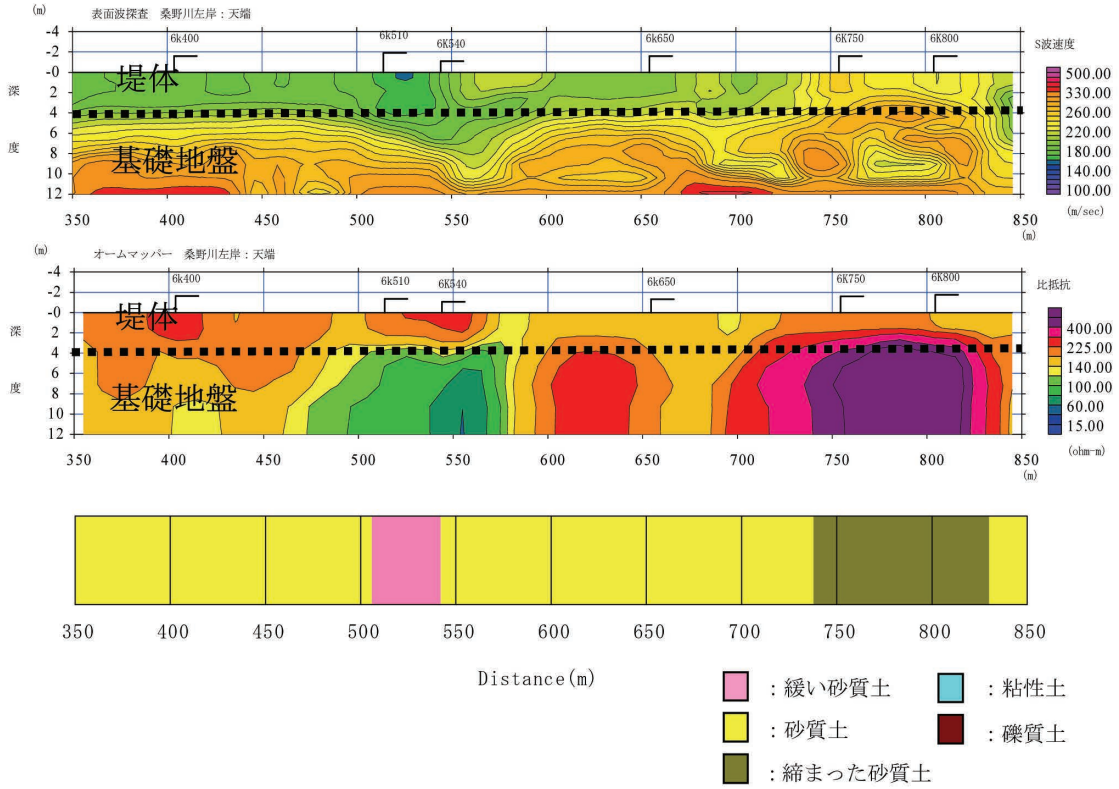


図-4 天端測線の S 波速度 (上)、比抵抗値 (中) および開削前の堤体の土質区分 (下)

Fig. 4 S-wave velocity (top), resistivity (middle) and estimated soil type (bottom) for levee body obtained by a survey line on levee crown.

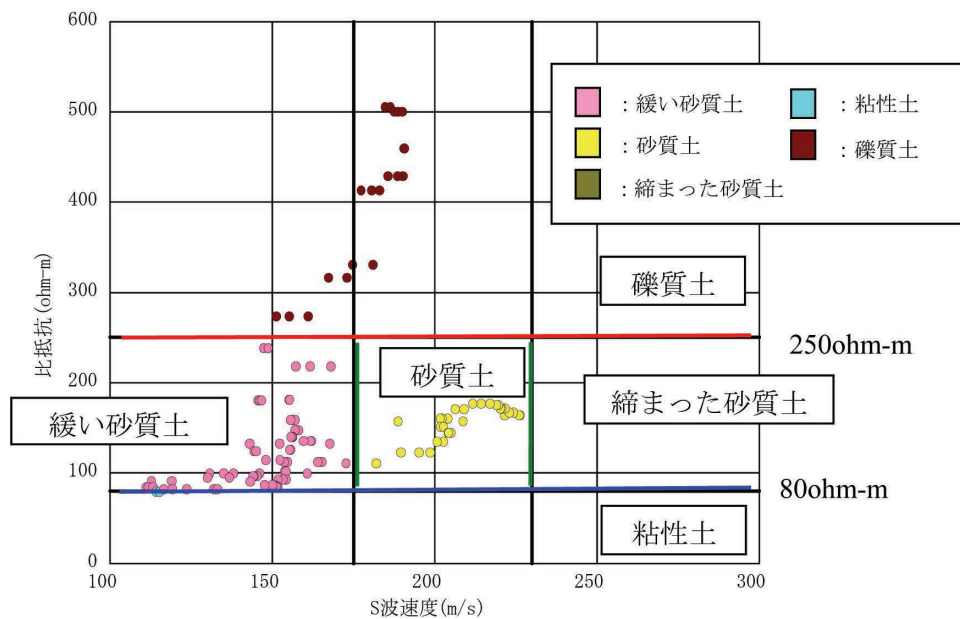


図-5 S 波速度と比抵抗値のクロスプロット (堤外測線) と開削前の土質区分

Fig. 5 Cross plot of S-wave velocity and resistivity with initial soil type interpretation for levee foundation (river side).

データ(6k350~6k850m)のクロスプロットを図-5に示す。用いたデータは、表面波探査結果の深度3.5mまでの平均S波速度と、牽引式電気探査の結果の深度3.8mまでの平均比抵抗値である。距離標7k400の位置にある既存のボーリング土質柱状図(図-6)などをもとに、粘性土と砂質土の境界値を80ohm-m、砂質土と礫質土の境

界値を250ohm-mと推定し、基礎地盤の表層の土質区分を行った。比抵抗値から砂質土と推定される部分でも、S波速度は大きい部分と小さい部分が存在するため、緩い砂質土、締まった砂質土として区別した。このようにして推定した基礎地盤の表層部の土質区分結果を図-7に示す。

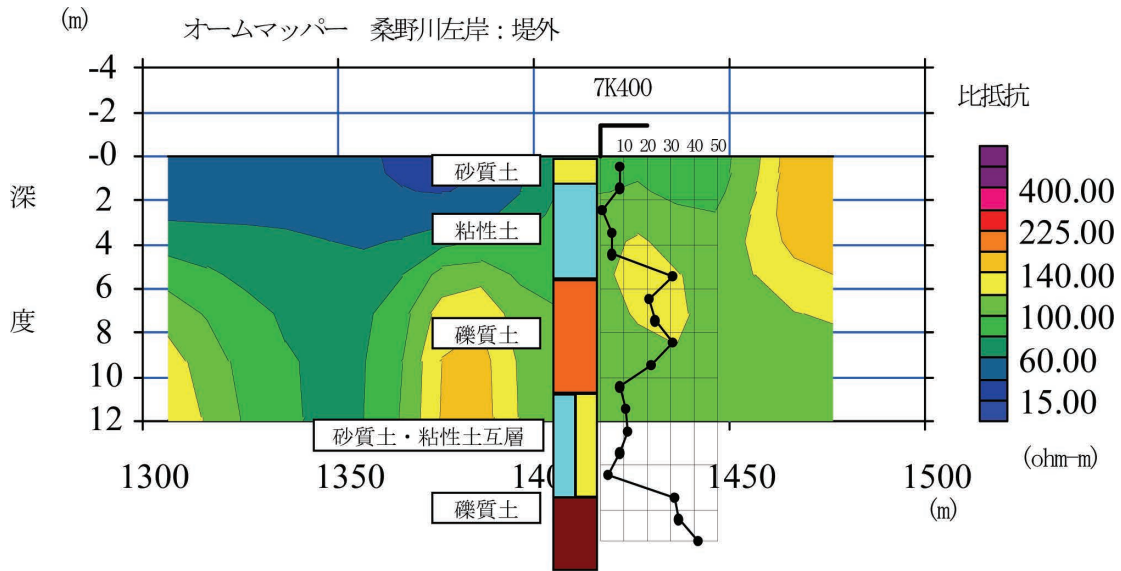


図-6 距離標7k400地点の既存のボーリング結果とその付近の牽引式電気探査の結果

Fig. 6 Soil column of existed borehole and resistivity structure obtained from a capacitive-coupled resistivity system.

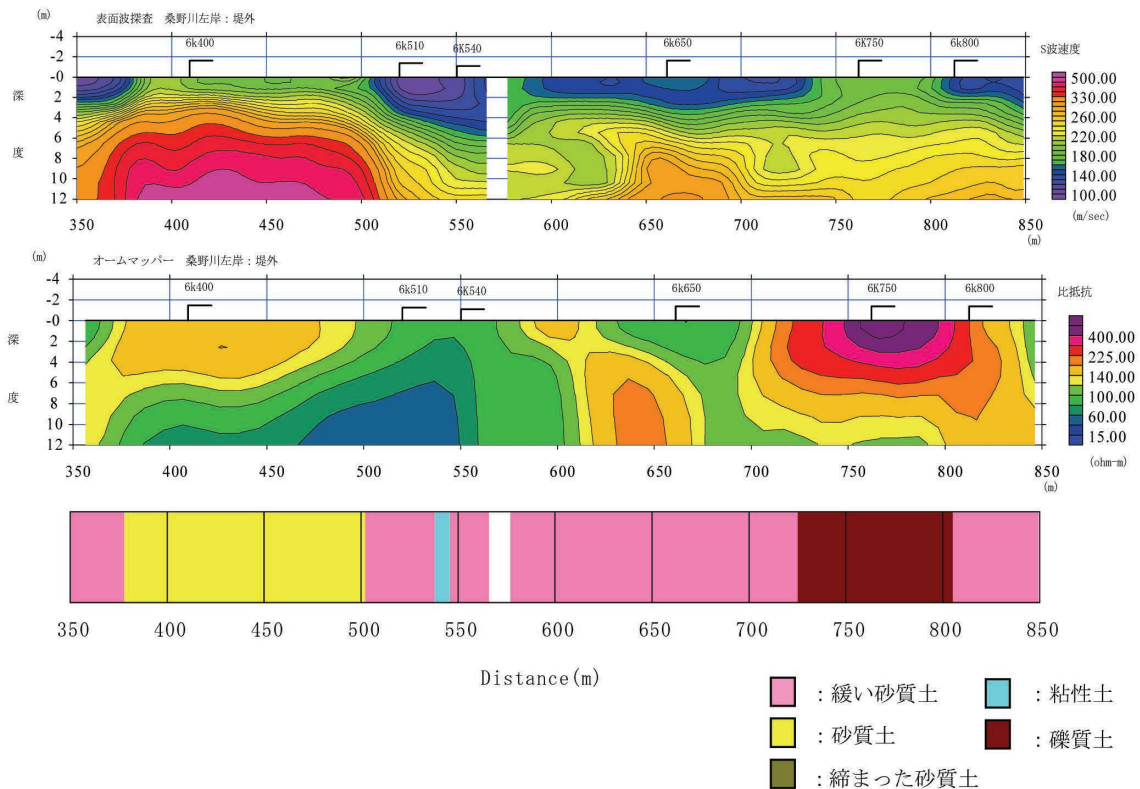


図-7 S波速度(上)、比抵抗値(中)および開削前の基礎地盤(下)の土質区分

Fig. 7 S-wave velocity (top), resistivity (middle) and estimated soil type (bottom) for levee foundation obtained by a survey line at river side foundation.

3. 開削調査

3.1 調査位置

開削調査は、桑野川左岸6k400～6k800の区間の中で6箇所実施した。開削地点を図-8に示す。

3.2 開削箇所における調査内容

平成17年度に実施した非破壊調査のうち、牽引式電気探査と表面波探査の結果を検証するために、各開削箇所において以下の調査を実施した。

●簡易貫入試験

堤体および基礎地盤の締まり具合を把握するために、川表のり肩付近、川裏のり肩付近、川表のり尻付近、川裏のり尻付近で実施した(1断面当たり4箇所)。

●現場密度測定

開削面の表面から内径φ75mmの短管を押し込み、採取した試料の湿潤密度を測定した(1断面当たり

4～7試料)。

●締固め試験

表面から試料を採取して室内試験で最適含水比、最大乾燥密度を測定した(1断面当たり1～2試料)。

●含水比および粒度試験

上記の湿潤密度、突固め試験実施箇所の他に、試験掘箇所です質判定のために含水比、粒度試験を行った(1断面当たり7～21試料)。

●表面波探査

開削された基礎地盤の地表面で表面波探査を行った(1断面当たり1測線)

●比抵抗測定

開削面の比抵抗を約1m間隔で測定した(1断面当たり50～80箇所)。測定には等間隔四極法(ウェンナー法)を用い電極間隔は40cmとした。また、基礎地盤の地表面においては垂直探査を実施した(1断面当たり1～2測線)。

これらの調査を実施した概略の位置を図-9に示す。



図-8 開削調査地点位置図(桑野川航空写真 撮影:平成16年4月 縮尺1:6500 国土交通省四国地方整備局 那賀川河川事務所¹³⁾に加筆)

Fig. 8 Location of excavation (modified from the aerial photograph of Kuwano river).

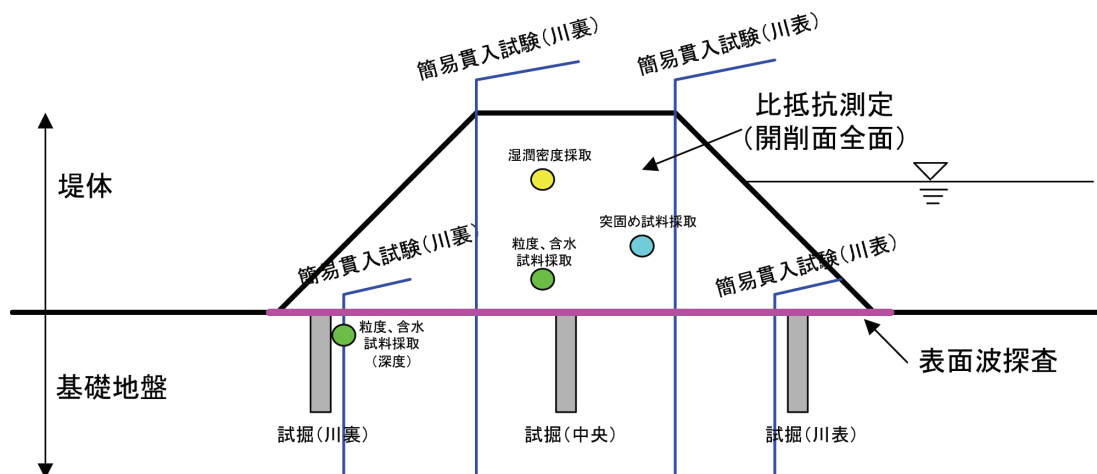


図-9 試験箇所位置図

Fig. 9 Outline of geotechnical and geophysical tests at excavated levee.

3.3 探査結果

(1) 堤防断面の土質構成

図-10に、開削断面のスケッチ図および写真を開削断面毎に示す。スケッチ図と写真から、6k400、6k510、6k540の3断面では堤体の上部と下部で明らかに土質が異なり、上部は砂礫主体、下部は粘性土や砂質土主体であることがわかる。また、6k400、6k510断面では、堤防下部の全体に粘性土、砂質土が分布しているのに対して、6k540断面では、川表側には礫質土、川裏側に粘性土が分布していることがわかる。この川表側の礫質土は、旧堤防とも考えられるが、記録には残されておらず、現時点では、旧堤防かどうか不明である。6k650断面では、川表側のみ粘性土が分布する。

これに対して、6k750、6k800断面では堤体全体が砂礫主体であることがわかる。しかしながら開削断面下部付近では、粘性土が確認されており、基礎地盤と堤防の境界付近は、薄い粘性土が分布することがわかる。

(2) 堤体土の土質特性

①簡易貫入試験結果

各断面で実施した簡易貫入試験結果から換算N値を算出し深度分布図を作成した。図-11に得られた換算N値および概略の土質区分を示す。

図-11において、堤体部分は深度4m付近までであり、以深は基礎地盤と考えられる。全体的には、堤体の換算N値は、5前後から10程度であることがわかる。また、所々換算N値が大きくなっている部分があるが、これは礫に当たったことによるものと考えら

れる。各断面による土質特性の違いをわかりやすくするために、各断面で同じ土質の範囲で換算N値を平均した。図-12に各断面で土質ごとに平均した換算N値、図-13にはその土質ごとの頻度を示す。換算N値の平均値でみると、礫質土部分については、4～15程度の値を示しており、堤体土の締まり具合は場所によってかなり異なるものと推察される。土質ごとの換算N値の特徴は下記のようにまとめられる。

● 粘性土

換算N値は、1～10程度を示すことが多く、かなりばらついている。

● 砂質土

換算N値は、3.9～9.7を示す。砂質土は他の土質に比べてやや小さい値を示す。

● 礫質土

換算N値は、4.4～14.9を示すが、8前後の値が多い。全体にかなりばらついている。5以下の箇所は、礫周辺が緩んでいるためであると考えられる。

②含水比、細粒分含有率、締固め度について

断面毎の含水比、細粒分含有率、締固め度の一覧表を表-1に示す。同表から以下のことがわかる。

● 含水比

含水比は全体に非常に小さく30%以下となっている。また、下流の6k400、6k510付近の方が上流の6k540～6k750よりも含水比は小さい。また最上流の6k800ではふたたび含水比は小さくなっている。

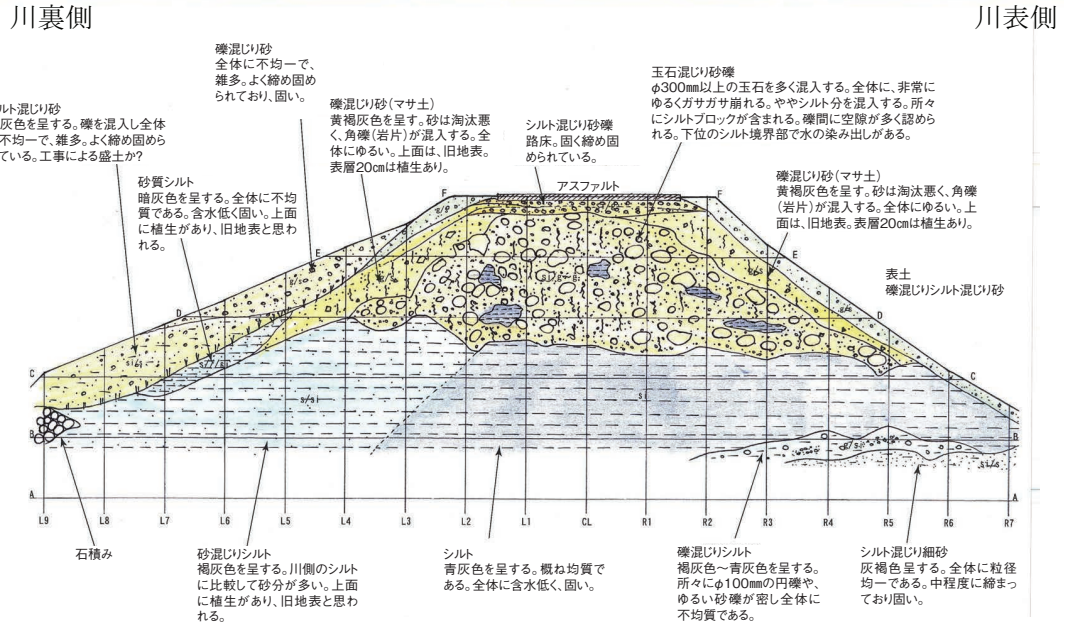
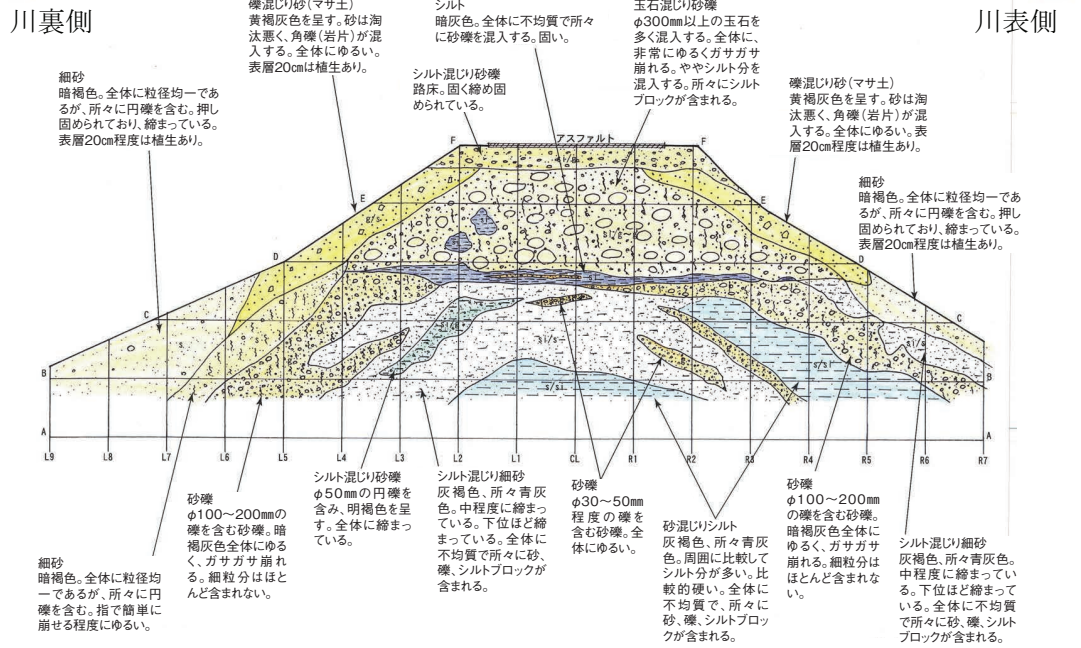


図-10 開削断面のスケッチ図および写真(1)
Fig. 10 Geological sketch and a photograph of excavated levee body (1).

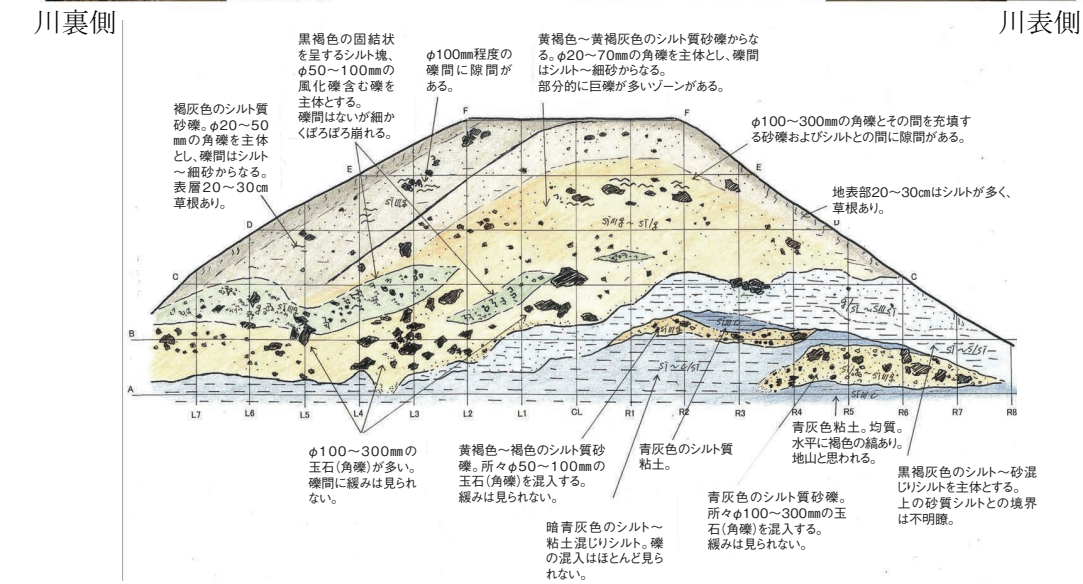
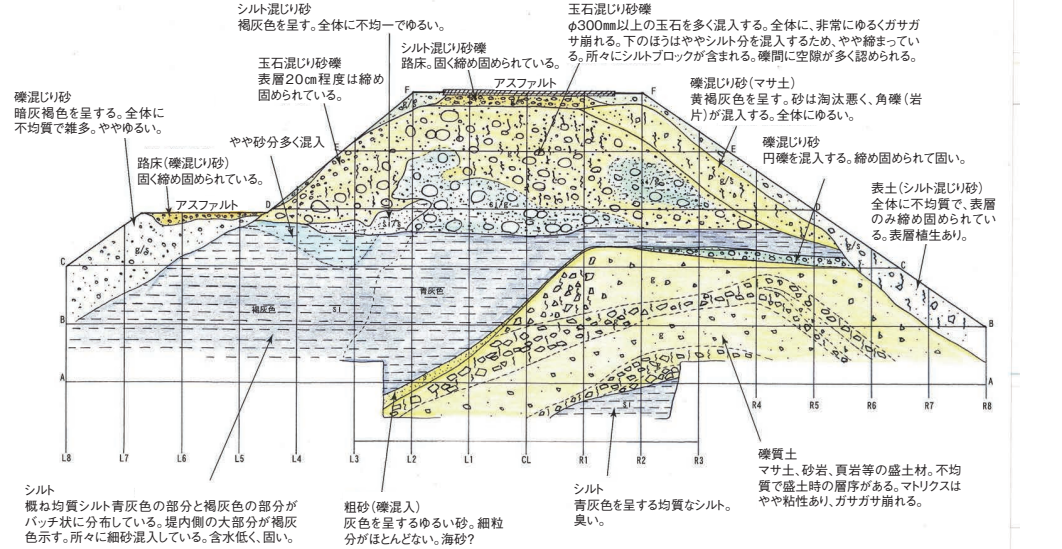
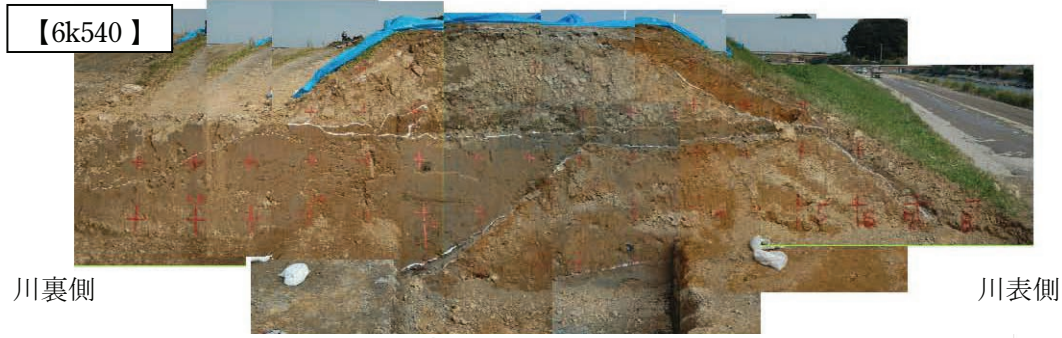


図-10 開削断面のスケッチ図および写真(2)

Fig. 10 Geological sketch and a photograph of excavated levee body (2).

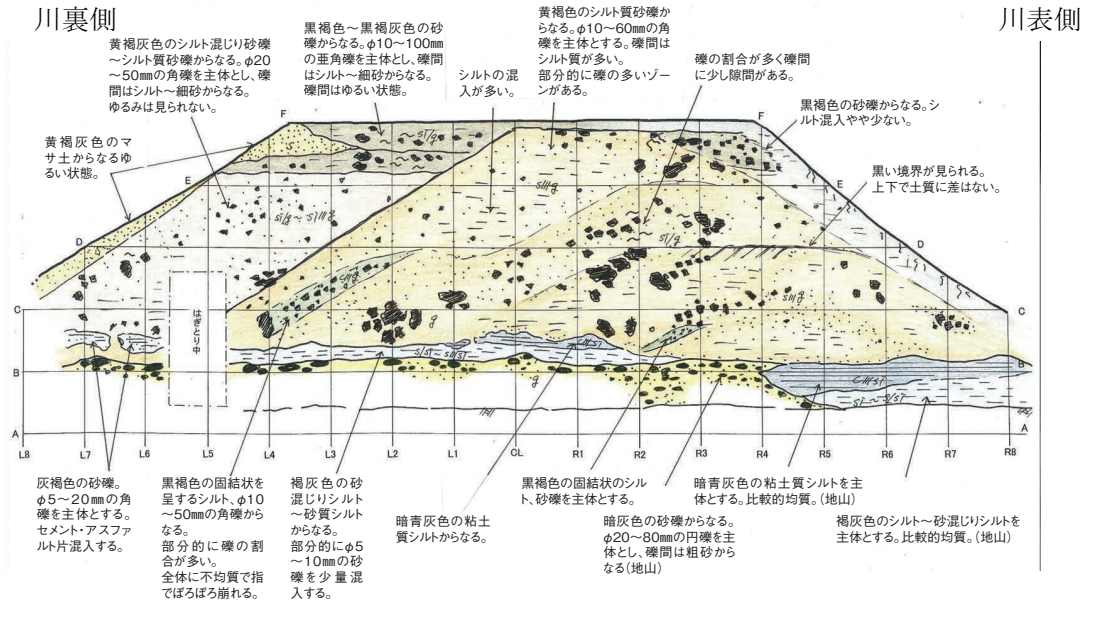
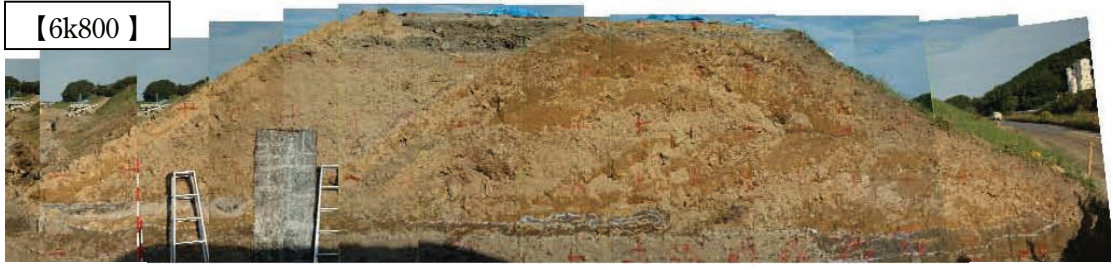
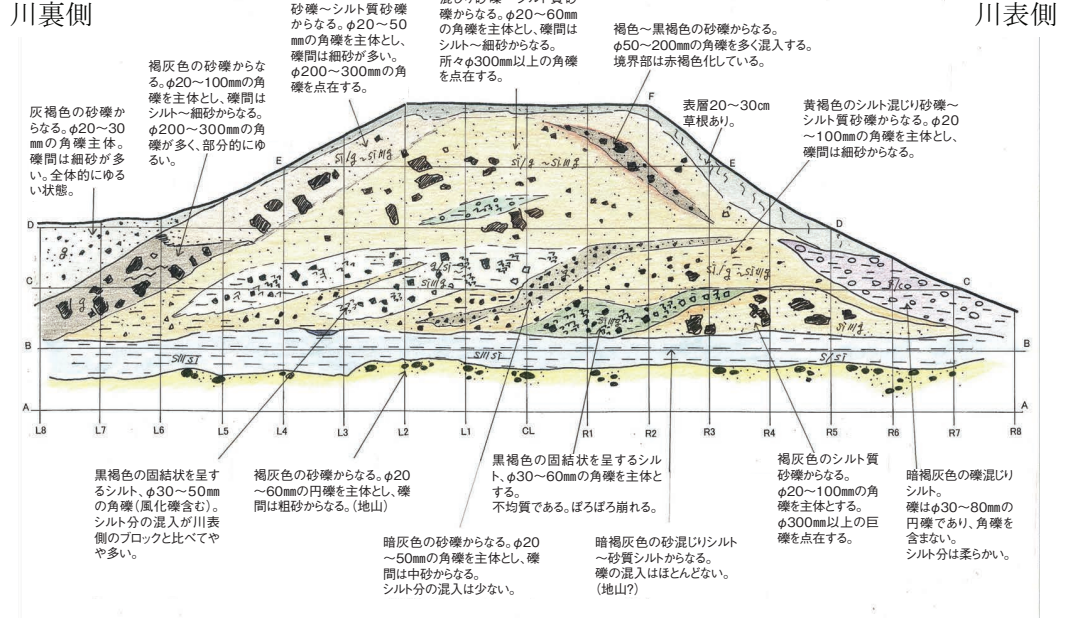


図-10 開削断面のスケッチ図および写真(3)
 Fig. 10 Geological sketch and a photograph of excavated levee body (3).

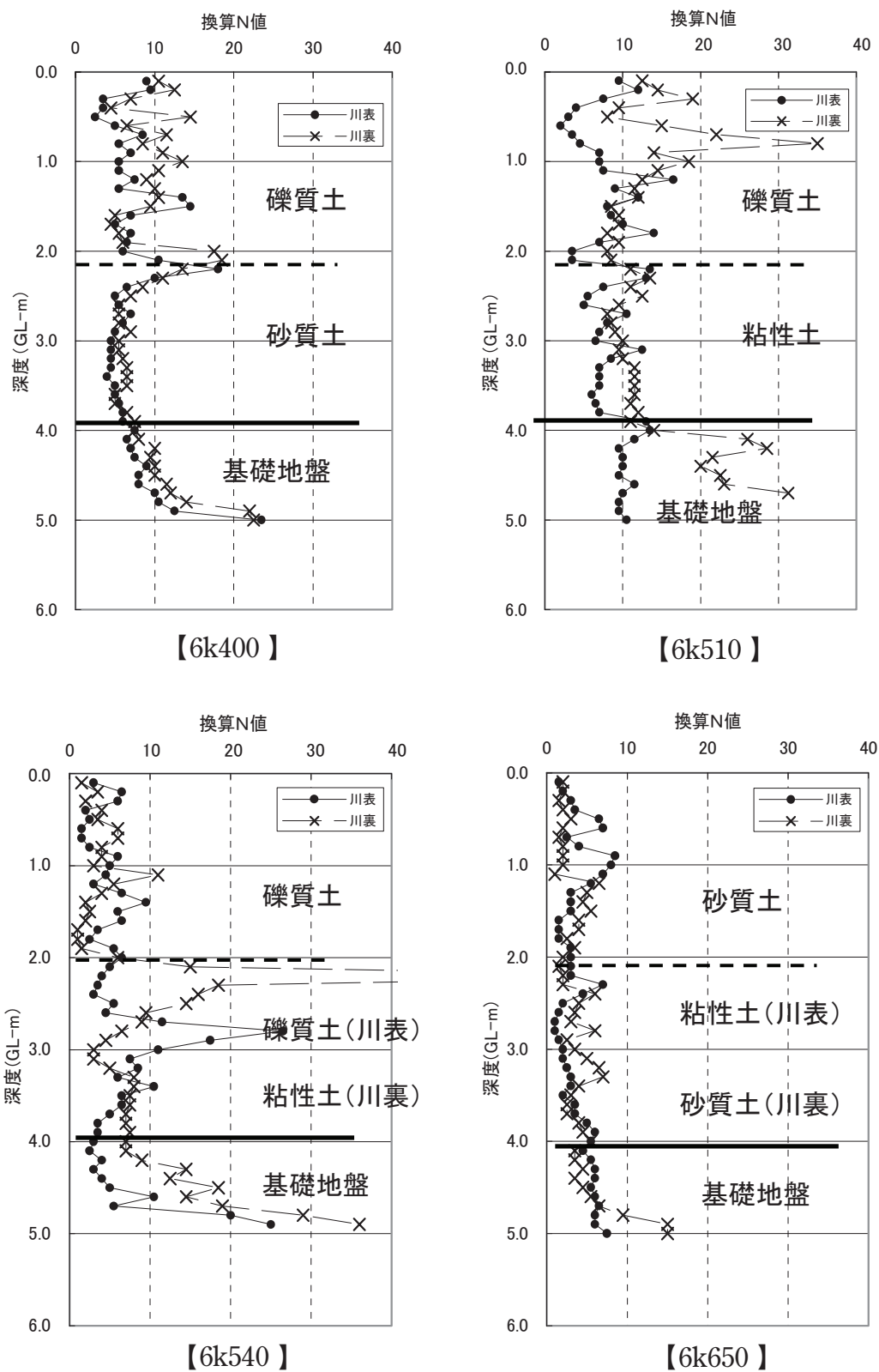


図-11 堤体における簡易貫入試験から得られた換算N値と概略の土質区分(1)

Fig. 11 Converted N-value obtained through portable dynamic cone penetrating tests for levee body (1).

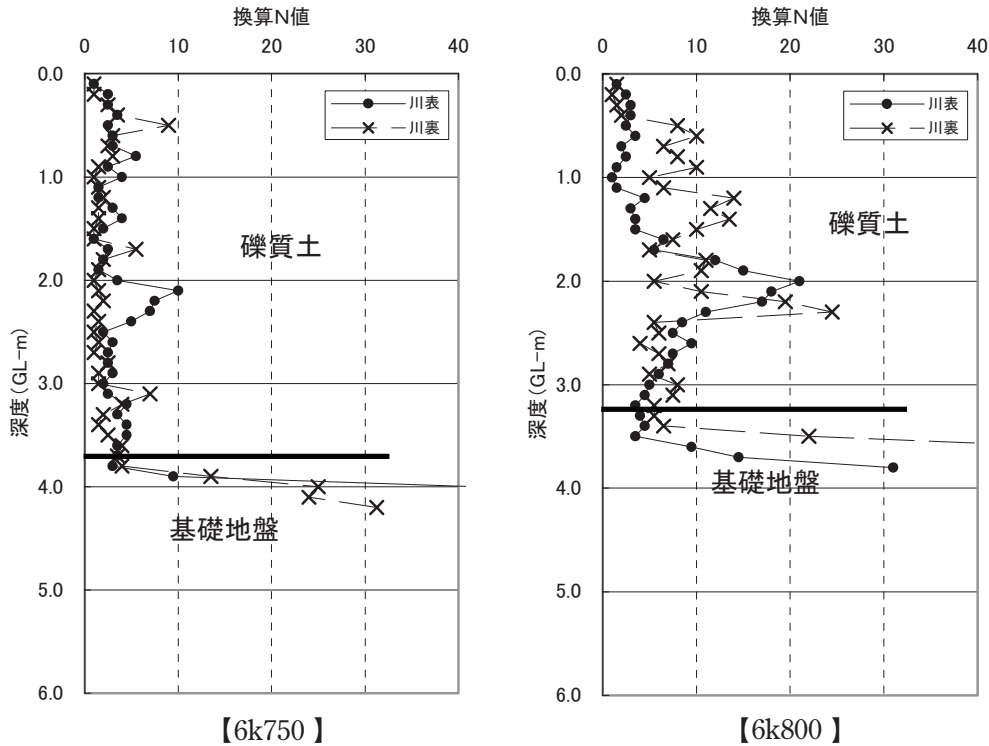


図-11 堤体における簡易貫入試験から得られた換算N値と概略の土質区分(2)

Fig. 11 Converted N-value obtained through portable dynamic cone penetrating tests for levee body (2).

		川裏		川表	
		表層部	下部	表層部	下部
6K400	表層部	9.7	7.0	粘性土	
	下部	9.7	7.9	砂質土	
6K510	表層部	13.3	7.7	礫質土	
	下部	17.6	9.3		
6K540	表層部	7.8	6.6		
	下部	12.7			
6K650	表層部	4.2	3.9		
	下部		4.4		
6K750	表層部	4.4	4.7		
	下部				
6K800	表層部	14.9	7.8		
	下部				

図-12 堤体の換算N値の土質ごとの平均値

Fig. 12 Converted N-value for levee body averaged by soil type.

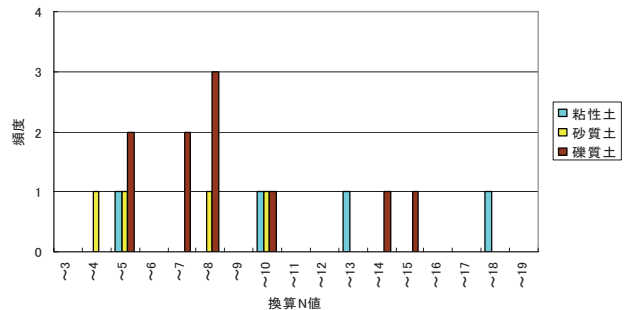


図-13 堤体の換算N値(平均値)の土質ごとの頻度

Fig. 13 Frequency of converted N-value for levee body averaged by soil type

表-1 含水比、細粒分含有率、締固め度の一覧表(堤体土)

Table. 1 Water content, fine fraction content and degree of compaction for levee body.

開削断面位置	含水比(%)		細粒分含有率(%)		締固め度(%)
	範囲	平均値	範囲	平均値	範囲
6k400	3.3~19.9	10.2	2.3~48.0	21.9	81.6~82.1
6k510	4.0~23.1	14.9	6.6~82.6	44.6	83.4~97.9
6k540	3.3~28.4	19.2	1.9~84.4	36.4	98.9
6k650	17.0~23.2	21.9	19.2~70.2	51.3	76.7
6k750	15.9~24.9	20.5	26.6~62.0	41.3	77.1~78.7
6k800	3.8~28.0	13.3	0.9~47.8	20.7	71.8

● 細粒分含有率

含水比は30%以下と非常に小さいものの、細粒分含有率は40~50%以上を示すものが約半数程度認められる。

● 締固め度

一部に60%程度が認められるが、ほとんど75%以上であることがわかる。

③ 粒度組成

堤体は大きく、「粘性土」「砂質土」「礫質土」に大別される。土質ごとの堤体土の粒径加積曲線図を図-14に示す。

図-15に含水比と細粒分含有率の関係を示す。含水比が15~25%程度であっても、細粒分含有率は50%以上となる箇所がある。このため、堤体土質は非常に乾いた状態であることがわかる。

④ 湿潤密度、飽和度、間隙比

湿潤密度と飽和度の関係を図-16に、湿潤密度と間隙比の関係を図-17に示す。湿潤密度が大きいほど飽和度が高く、間隙比は小さくなることがわかる。

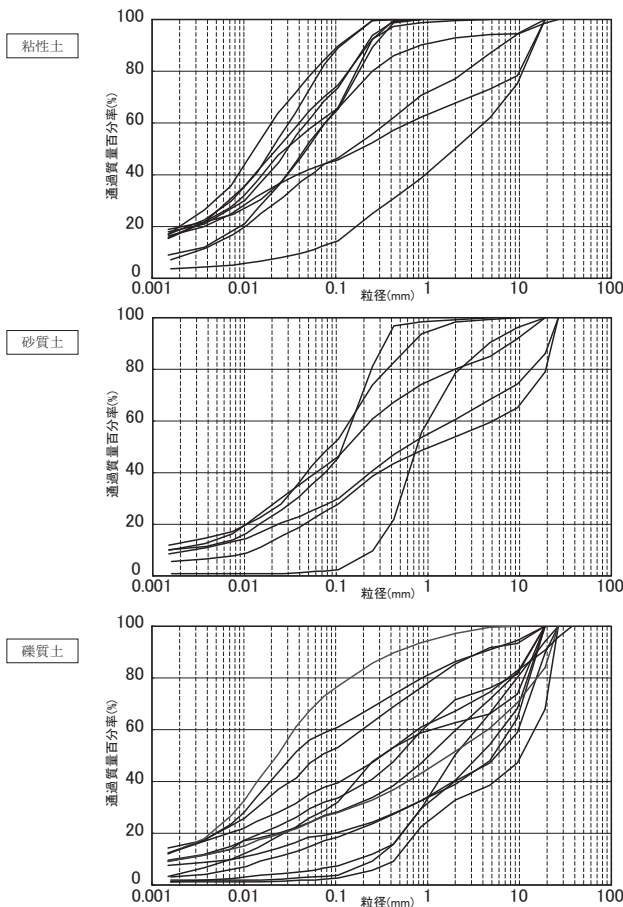


図-14 堤体土の粒径加積曲線図

Fig. 14 Grain size distribution curves for levee body.

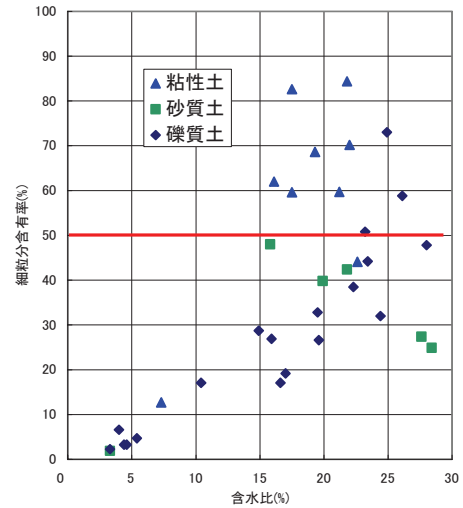


図-15 含水比と細粒分含有率との関係(堤体土)

Fig. 15 Relationship between water content and fine fraction content.

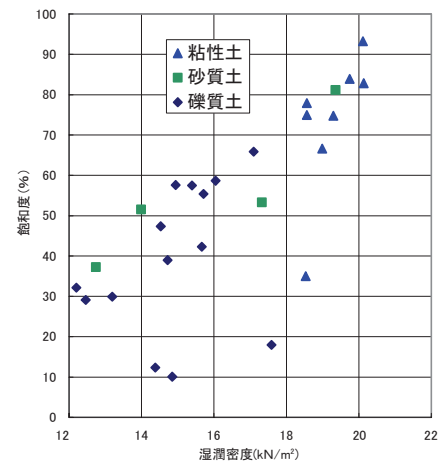


図-16 湿潤密度と飽和度の関係(堤体土)

Fig. 16 Relationship between wet density and degree of saturation.

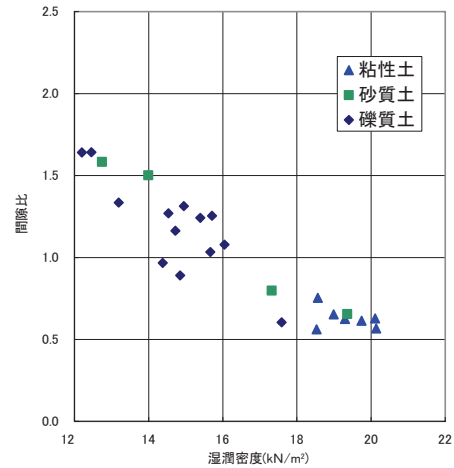


図-17 湿潤密度と間隙比の関係(堤体土)

Fig. 17 Relationship between wet density and void ratio.

通常、湿潤密度は、粘性土で小さく、砂質土・礫質土で大きな値となるが、今回の場合は粘性土の方が砂質土・礫質土よりも大きな値となった。その理由としては、開削調査の観察時では、粘性土は全体に固結していたため湿潤密度が大きくなり、砂質土・礫質土は、堤体が非常に緩んでいたために湿潤密度が小さくなったと考えられる。これは開削時に緩んだのか、もともと少し緩んでいたのかは不明であるが、粘性土に比べて砂質土・礫質土の湿潤密度はやや小さくなっていたものと考えられる。

⑤比抵抗

図-18に、開削面および基礎地盤で行った比抵抗測定の結果例を示す。図-18において、地表面より上は1m間隔で行った測定であり断面の比抵抗を直接測定したものであるが、地表面下は基礎地盤面で行った垂直探査の結果から逆解析で求めたものである。比抵抗は低い場所では70ohm-m以下、高い場所では

2000ohm-m以上であり場所によって大きく異なるが、図-10に示した開削面の写真やスケッチと比べると、概ね砂礫部分は高比抵抗、シルト部分は低比抵抗となっていることがわかる。

(3) 基礎地盤の土質特性

①簡易貫入試験結果

各開削地点の基礎地盤表面で実施した簡易貫入試験の結果と、試掘などにより確認した概略の土質区分を図-19に示す。各地点の土質構成は下記のようにまとめられる。

● 6k400

粘土混じりシルト層は、換算N値は1~3程度であるが、礫混じり砂層では10以上を示す。

● 6k510

粘土混じりシルト層と礫混じり砂層が分布している。換算N値は、ほとんど差がなく、5以下を示す。

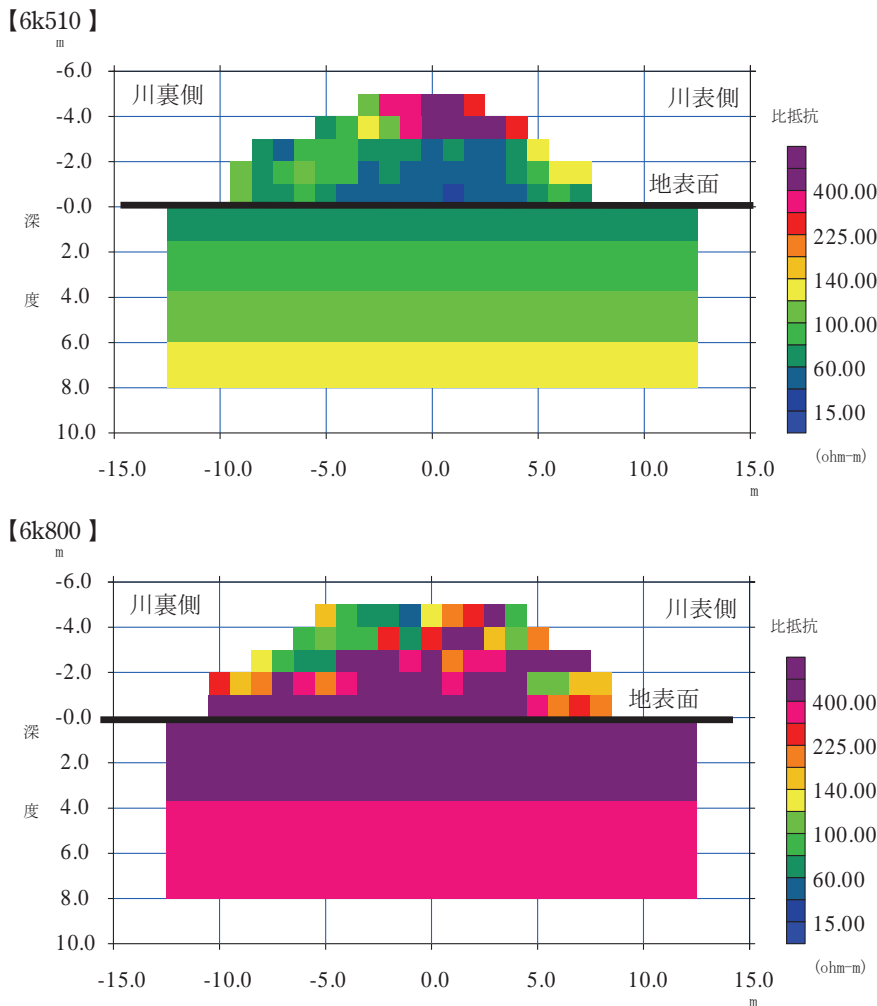


図-18 開削面および基礎地盤の比抵抗測定結果例 (上: 6k510, 下: 6k800)
 Fig. 18 Example of resistivity distribution obtained through resistivity measurements at body and foundation of levee (top: 6k510, bottom: 6k800).

● 6k540

粘土混じりシルト層と礫混じり砂層が分布している。換算N値は、ほとんど差がなく、5以下を示す。この傾向は、6k510 とほぼ同様である。

● 6k650

表層付近には、粘土混じりシルト層、下位には川表側には砂質シルト層、川裏側には砂礫層が分布する。砂礫層は、換算N値で50以上を示すが、粘土混じりシルト層、砂質シルト層は、3~10程度を示す。

● 6k750

基礎地盤は、砂礫層が分布する。換算N値は所々5程度を示すが、全体的には10前後を示し、一部は非常に大きく20程度を示す。

● 6k800

基礎地盤は、砂礫層が分布する。換算N値は5~10程度を示す。

図-20に、各開削地点において土質ごとにまとめた簡易貫入試験結果の平均値と、土質区分を示す。6k400

~6k650の4断面については、表層部(掘削面から深度2m程度)と下部に分けて平均した。図-21に平均した換算N値の土質ごとの頻度を示す。換算N値と土質の明瞭な関係は見られない。

②粒度組成

基礎地盤は大きく、「粘土混じりシルト」「シルト混じり砂」「礫混じり砂」「砂礫」に大別される。地層毎の粒径加積曲線を図-22に示す。

●粘土混じりシルト

細粒分を45~80%程度含む。全体にややばらつきがある。

●シルト混じり砂

粘土混じりシルトに比べてやや細粒分が少ない。

●礫混じり砂

全体に不均質である。

●砂礫

礫分(2mm以上)は70%以上含む。全体に均質である。

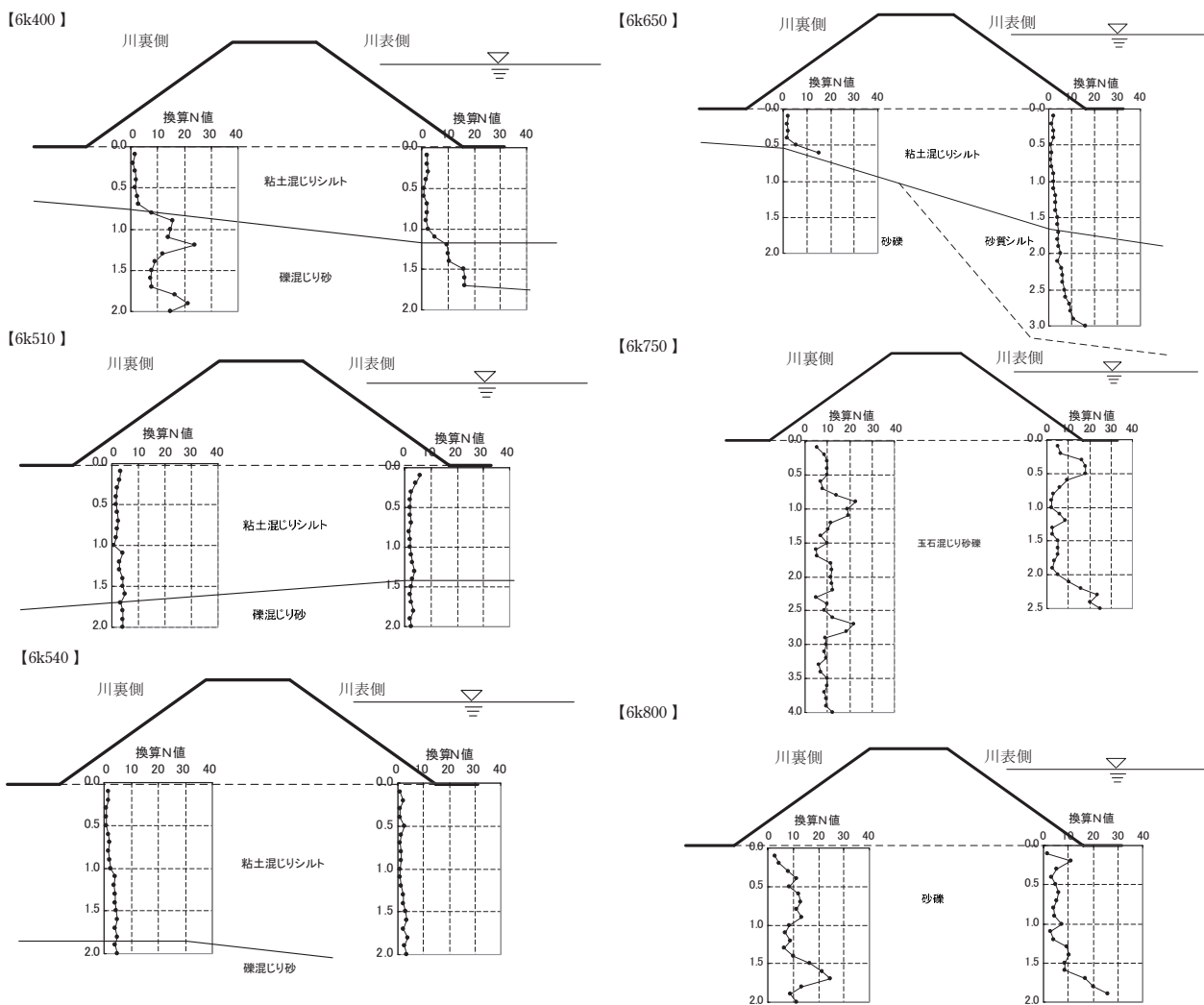


図-19 基礎地盤における簡易貫入試験から得られた換算N値と概略の土質区分

Fig. 19 Converted N-value obtained through portable dynamic cone penetrating tests for levee foundation and outline of soil type (1).

		堤内		堤外		
		表層部	下部	表層部	下部	
6K400	表層部	10.9	2.1	粘性土		
	下部	18.3	17.2		砂質土	
6K510	表層部	2.8	2.8	礫質土		
	下部	4.0	2.3			
6K540	表層部	2.6	2.1	粘性土		
	下部	4.5				
6K650	表層部	2.5	4.8	砂質土		
	下部	15.0				
6K750	表層部	10.7	8.8	粘性土		
	下部					
6K800	表層部	10.7	9.8	粘性土		
	下部					

図-20 基礎地盤の換算N値の土質ごとの平均値

Fig. 20 Converted N-value for levee foundation averaged by soil type

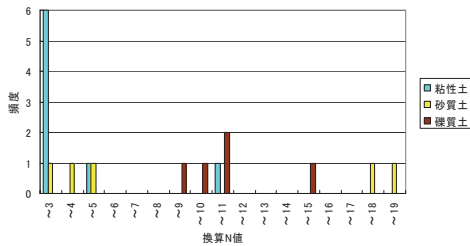


図-21 堤体の換算N値(平均値)の土質ごとの頻度

Fig. 21 Frequency of converted N-value for levee body averaged by soil type

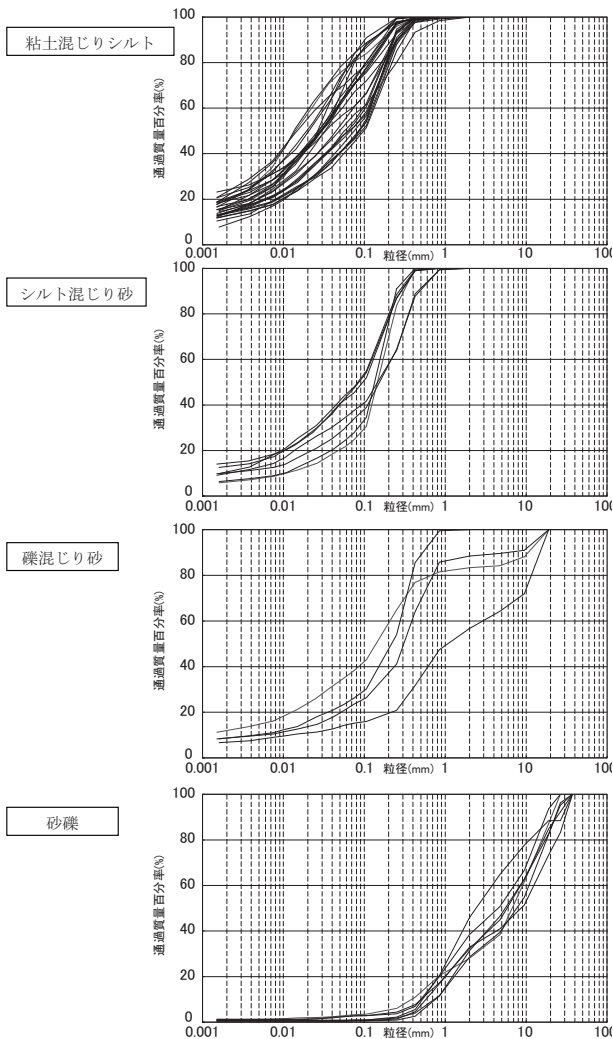


図-22 堤体土の粒径加積曲線図

Fig. 22 Grain size distribution curves for levee body.

③含水比

各地層の含水比は、粘土混じりシルトで $w_n=20\sim 30\%$ 、シルト混じり砂で $w_n=20\sim 25\%$ 、礫混じり砂で、 $w_n=10\sim 20\%$ 、砂礫で $w_n=5\sim 10\%$ 程度である。特に、粘土混じりシルトの含水比は非常に小さい。

④比抵抗

開削された地表面(概ね基礎地盤面と考えられる)において、垂直探査を行い基礎地盤の比抵抗を推定した。推定した比抵抗構造の例は、開削面における比抵抗測定結果と併せて図-18に示した。比抵抗は低い場所では50ohm-m以下、高い場所では2000ohm-m近くであり、場所により基礎地盤の比抵抗が大きく異なることがわかる。

⑤S波速度

図-23に、基礎地盤の地表面で行った表面波探査の結果から推定したS波速度構造例を示す。断面によってS波速度が大きく異なることがわかる。また6k650mのように、堤外側と堤内側で速度構造が異なる場合があることがわかる。

4. 探査結果の検証

物理探査結果を検証するためには、地表からの測定により地盤の比抵抗やS波速度などの正しい物理量を測定できるかという物理探査手法としての検証と、得られた物理量から土質や透水性などの工学的なパラメータを推定できるかという調査手法としての検証の二つに分けて考える必要がある。そこで、以下この2つの視点に基づいて探査結果を検証した後、非破壊調査結果を用いた土質区分の検証と、開削調査結果を用いた見直しを行う。

4.1 物理探査手法としての検証

今回の調査で用いた牽引式電気探査と表面波探査は、ともに地表から地下の物理量を逆解析などにより推定する調査手法であり、原位置試験や検層のように地盤の物理量を直接測定する手法ではない。したがって、得られた物理量には常にある程度の推定誤差が伴う。本節では、このような推定誤差が調査において許容できる範囲に収まるかどうかを検証する。

図-24に、牽引式電気探査の測定・解析から得られた堤体および深度2mまでの基礎地盤(堤外および堤内)の平均比抵抗と、開削面において測定した比抵抗の関係を示す。後者は、堤体については開削面で直接測定した比抵抗の平均値を表し、基礎地盤については開削箇所での基礎地盤面で行った垂直探査の結果から逆解析で求めたものである。図-24を見ると、6k750および6k800の開削面では、開削面における測定比抵抗

が牽引式電気探査により推定した値よりも高いものの、6k500～6k550の区間で最も比抵抗が低く6k750～6k800の区間で最も高い点など、牽引式電気探査により得られた比抵抗と開削面の測定比抵抗は概ね一致しているといえる。

開削面では堤体のS波速度を測定することが困難であったため、表面波探査の精度の検証は堤外および堤内法尻における測定結果と開削された基礎地盤面で測定した結果とを比較することにより行う。図-25に、法尻における表面波探査の測定・解析から得られた基礎地盤(深度2mまで)の平均S波速度と、開削地点の基礎地盤で測定したS波速度を対比して示す。両者を比較すると、6k500～6k550の区間で最もS波速度が低く6k750～6k800の区間で最も高いこと、6k400では堤外側、6k650では堤内側がそれぞれ高速度であることなど

概ね一致しているといえる。

以上のような検証から、堤体や基礎地盤の平均的な物性を把握するという点では、牽引式電気探査や表面波探査は概ね精度よく堤体や基礎地盤の比抵抗およびS波速度を推定できることがわかった。なお、同様な検証は林他(2007b)¹⁴⁾などでも行われているが、今回の検証と同様に牽引式電気探査と表面波探査から概ね正しい比抵抗とS波速度が得られている。

4.2 調査手法としての検証

次に、牽引式電気探査および表面波探査から得られた比抵抗およびS波速度が、土質やN値など工学的なパラメータと関連があるかどうかについて検証する。一般に比抵抗は土質、S波速度はN値と相関が良いことが知

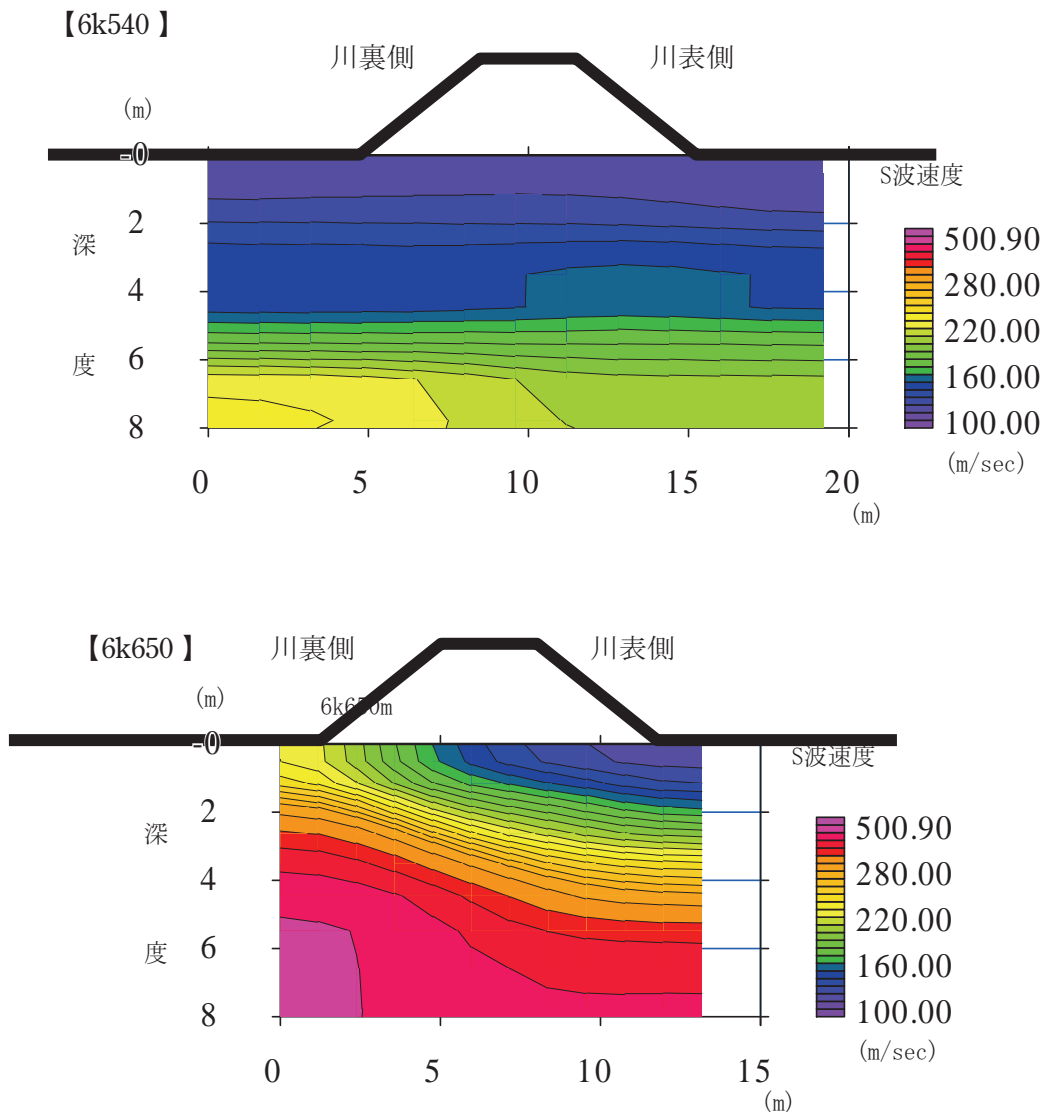


図-23 開削地点の基礎地盤の地表面で行った表面波探査結果例(上:6k540、下:6k650)

Fig. 23 Example of S-wave velocity models obtained through a surface-wave method for body foundation (top: 6k540, bottom: 6k650).

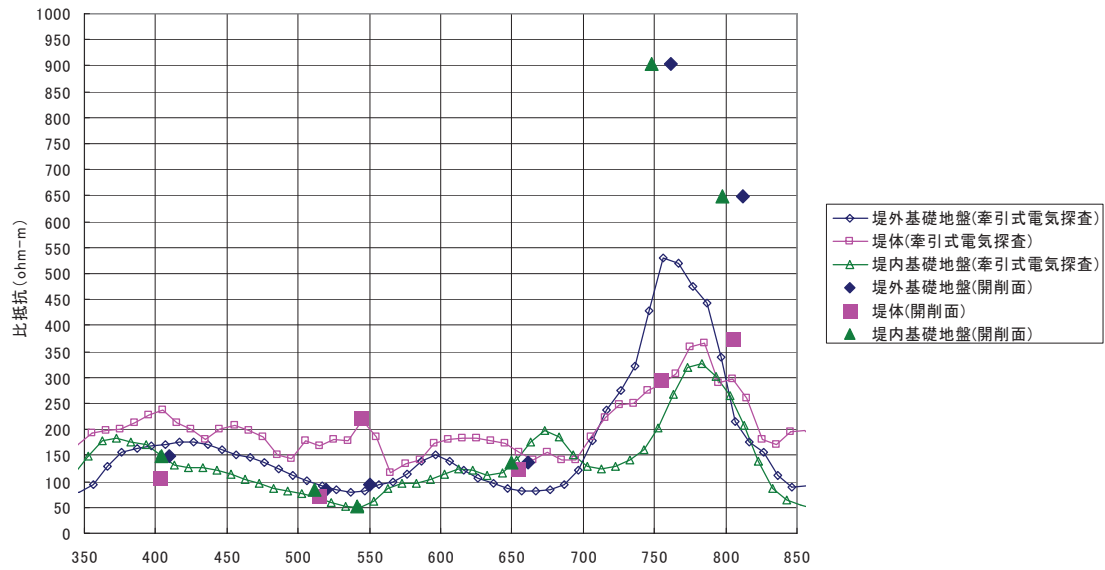


図-24 牽引式電気探査により得られた比抵抗と開削面における測定結果の比較

Fig. 24 Comparison of resistivity obtained through a capacitive-coupled resistivity system and measurements at excavated levee body.

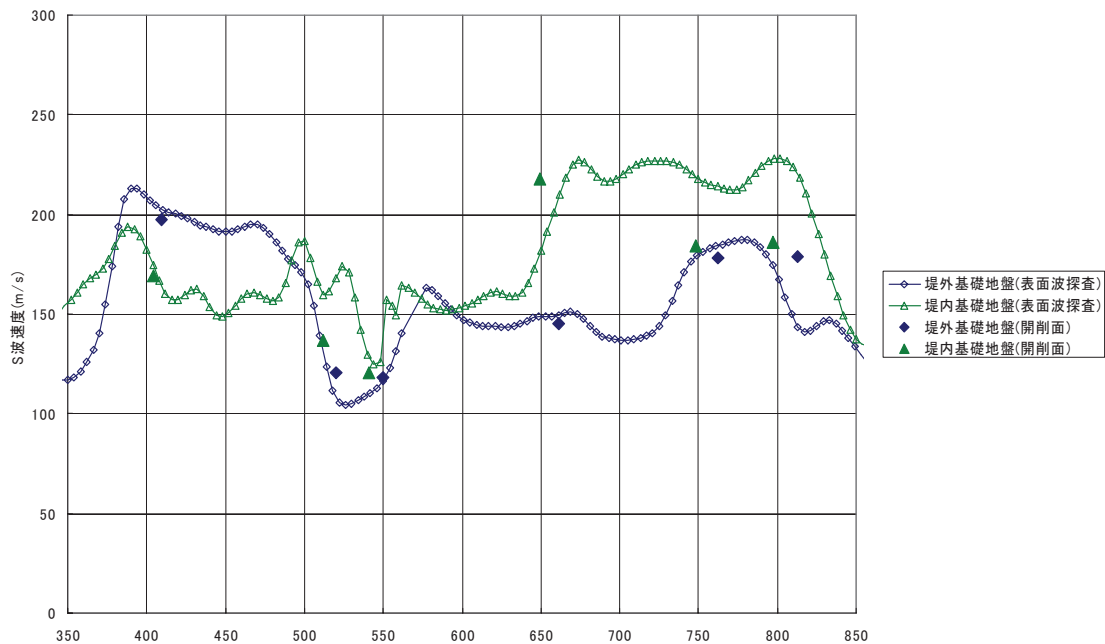


図-25 表面波探査により得られたS波速度と開削面における測定結果の比較

Fig. 25 Comparison of S-wave velocity obtained through a surface-wave method and measurements at excavated levee foundation.

られているので、ここでは開削面で測定した比抵抗と土の物理特性、表面波探査により得られたS波速度と換算N値についてまとめる。

(1) 比抵抗と土の物理特性

比抵抗は一般に、シルトや粘土等、細粒分が多い土質ほど低く、砂から礫へ粒径が大きくなるにしたがって高くなっていく。この傾向を検証するために、開削箇所において、土質試料を採取した地点で測定した比抵抗と土質試験結果についてまとめる。なお、開削面(堤体)については四極法で直接測定した比抵抗を用いるが、基礎地盤については地表面で測定した結果から逆解析で求めた地盤の比抵抗を用いる。

図-26に、比抵抗と粒度試験から得られた50%粒径および20%粒径の関係を示す。粒径が大きくなるほど比抵抗が高くなる傾向が明瞭である。堤体と基礎地盤を比べると、全体に基礎地盤の方が低比抵抗であるが、両者は同一線上に分布しており、本調査地においては堤体と基礎地盤を同一の基準で評価できることを示唆している。

図-27に比抵抗と細粒分含有率の関係を示すが、細粒分含有率が多くなるほど比抵抗が低くなる傾向が明瞭である。また、図-28に比抵抗と含水比の関係を示す。含水比が高くなるほど比抵抗が低くなる傾向が明瞭である。このような傾向は一般的に知られているものであり、アーチーの式から予測される結果とも一致し、また松尾他(2007)¹⁵⁾に示されている堤体開削面における比抵抗測定の結果とも一致している。なお、細粒分含有率との関係にも含水比との関係にも、堤体と基礎地盤で有意な違いは見られない。

(2) S波速度と換算N値の関係

S波速度は一般にN値との相関が良好であることがわかっており(Imai and Tonouchi, 1982)¹⁶⁾、河川堤防の調査においてもN値や締固め度と比較した事例が報告されている^{6) 10)}。ここでは、S波速度とN値の関係を検証するために、簡易貫入試験から得られた換算N値と表面波探査から得られたS波速度を比較する。堤体のS波速度は開削前の天端における測定から求めたものであり、基礎地盤は開削後に地盤表面で行った測定から求めたものである。換算N値とS波速度は、堤体および基礎地盤において概ね同じ土質と考えられる範囲を平均したものである。

図-29に、簡易貫入試験から得られた換算N値とS波速度の関係を土質ごとに整理した結果を示す。ばらつきはあるものの、換算N値が大きくなるにつれてS波速度が高くなる傾向が明瞭である。また、換算N値とS波速度の関係はImai and Tonouchi (1982)¹⁶⁾の関係と概ね一致していること、堤体と基礎地盤で有意な違いは見られないことがわかる。

4.3 土質区分の検証と見直し

前述のように、非破壊調査は地表から地盤中の物性値を逆解析などにより推定するものであり、本質的に推定誤差を伴う。また、比抵抗やS波速度と土質の関係には様々な要因が影響するので、比抵抗とS波速度から一意的に土質を推定することはできない。したがって、それぞれの調査地においてボーリングなどの他の情報を用い、総合的に解釈していく必要がある。そこで本節では、開削調査の結果明らかになった堤体および基礎地盤の土質構成を用いて、小西他(2007)⁸⁾で推定した堤体および基礎地盤の土質区分の検証および見直しを行う。

図-30に、開削面および開削地点の基礎地盤面で測定した比抵抗と対応する地点のS波速度(天端および基礎地盤表面で測定した表面波探査から推定)を、土質ごとに平均して示す(図中△印)。同図には、図-3.5に示した、非破壊調査結果から判定した土質も示した(図中○印)。

開削調査のデータ(△)は、ばらつきがあるものの全体としては小西他(2007)に示したようにS波速度が大きくなるにつれて比抵抗が高くなる傾向が明瞭である。点線は小西他(2007)⁸⁾で用いた、粘性土-砂質土(青点線)および砂質土-礫質土(赤点線)の境界であり、ここでは比抵抗により土質を区分している。

非破壊調査結果から判定した土質(○)と開削調査の結果(△)を比べると非破壊調査の土質判定ではS波速度180m/s以下、比抵抗150ohm-m以下の領域の大部分が緩んだ砂質土に判定されているが、開削調査によればこの領域の多くのデータが粘性土であった。また、開削調査の結果では締まった砂質土と評価しているS波速度230m/s以上、比抵抗200ohm-m以下の領域にも礫質土が存在することがわかる。つまり、非破壊調査の結果は粘性土部分を緩い砂質土、礫質土部分を締まった砂質土と評価していることがわかる。

そこで、砂質土-礫質土の境界の比抵抗を下げるとともに、両境界を左上がりの直線とした新しい土質区分を導入する。新しい土質区分の境界を図-30に実線で示す。小西他(2007)⁸⁾に示されているように、理論的にはS波速度と比抵抗の関係は右上がりの直線となり、左下から右上に向かって粘性土から礫質土へ粒径が大きくなると考えられる(図-31)。したがって、土質区分の境界をS波速度と比抵抗の関係に直交する左上がりの線とすることは、理論的にも妥当と思われる。なお、堤体と基礎地盤において有意な差が見られないことから、土質区分は共通とした。今回の開削調査では基礎地盤の試掘は深度2m以浅であり、地下水位面よりも上であった。このため、基礎地盤についても堤体と同様に扱うことができると考えられる。

この新しい境界を、牽引式電気探査および表面波探査から得られたS波速度と比抵抗に適用し、距離標6k350~6k850の区間について堤体および基礎地盤浅部の土質区分を見直した。なお、6k400、6k510、6k540の開

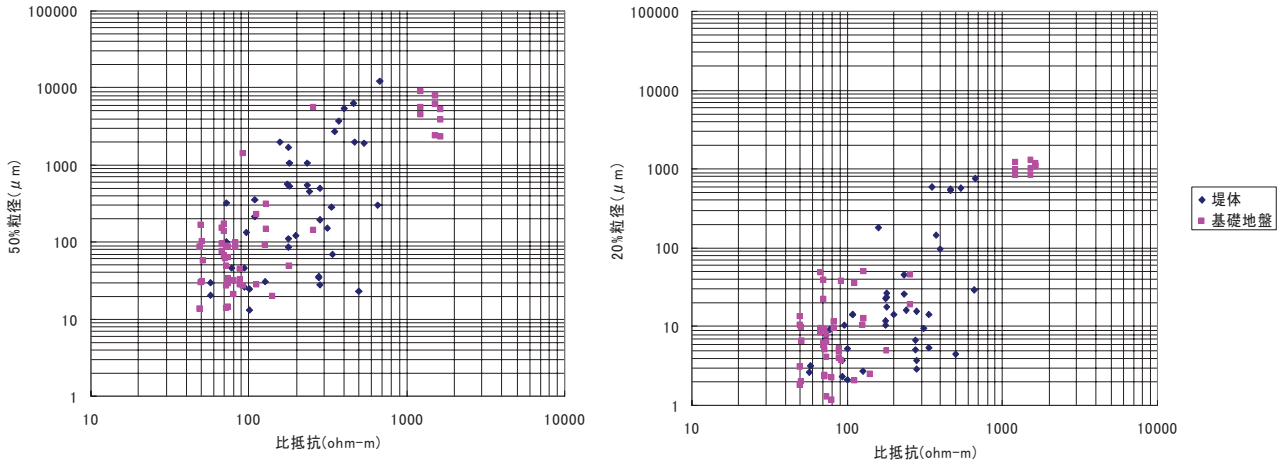


図-26 比抵抗と粒径の関係
Fig. 26 Relationship between resistivity and grain size.

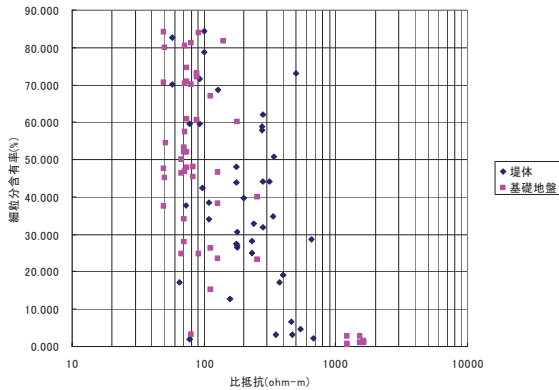


図-27 比抵抗と細粒分含有率の関係
Fig. 27 Relationship between resistivity and fine fraction content.

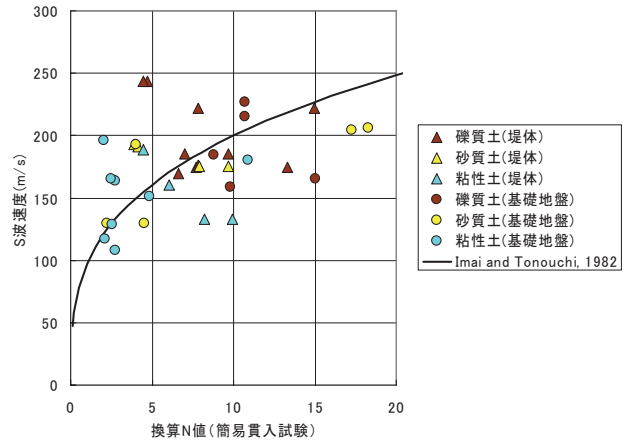


図-29 S波速度と換算N値の関係
Fig. 29 Relationship between S-wave velocity and converted N-value.

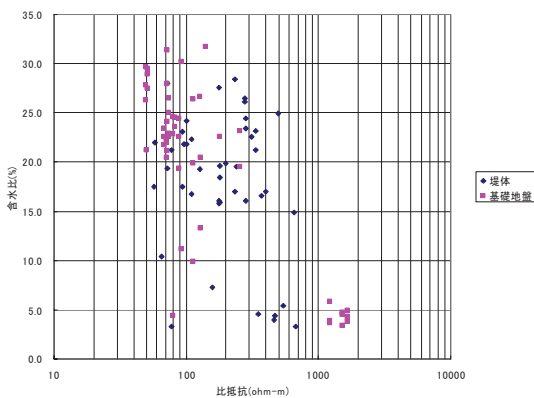


図-28 比抵抗と含水比の関係
Fig. 28 Relationship between resistivity and water content.

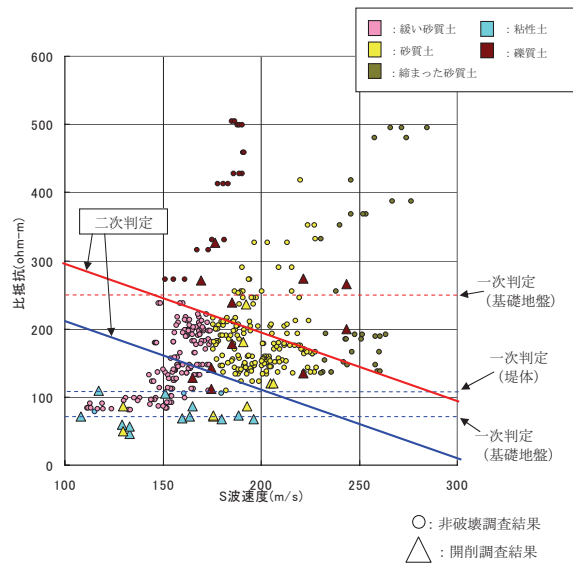


図-30 S波速度と比抵抗のクロスプロットと土質判定
Fig. 30 Crossplot of S-wave velocity and resistivity with initial and modified soil type interpretation.

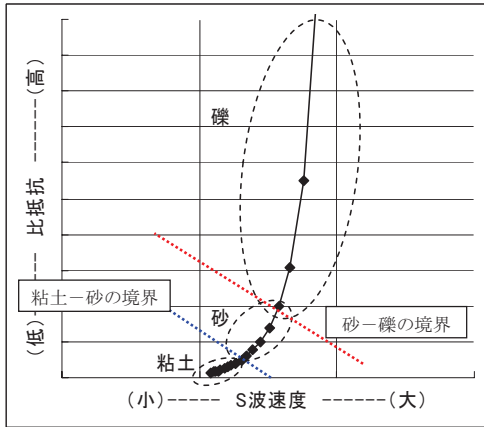
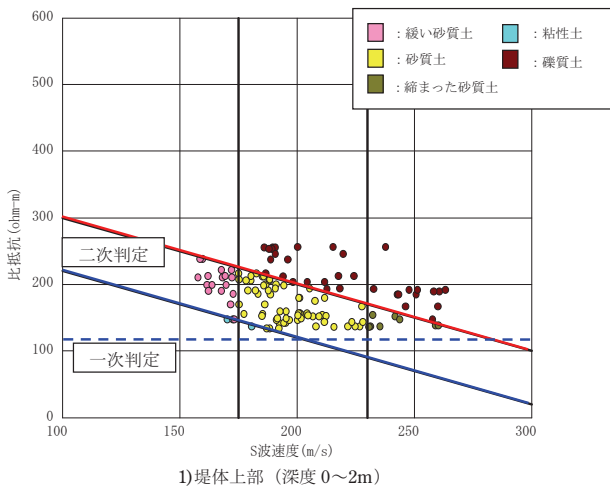
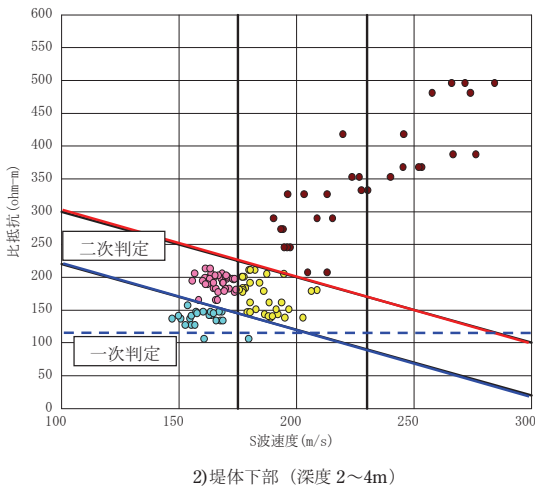


図-31 S波速度と比抵抗および土質の関係の概念図 (小西他 (2007)を修正)

Fig. 31 Schematic relationship between S-wave velocity, resistivity and soil type (Modified from Konishi et al., 2007).



1) 堤体上部 (深度 0~2m)



2) 堤体下部 (深度 2~4m)

図-32 堤体のクロスプロット (二次判定)

Fig. 32 Crossplot of S-wave velocity and resistivity with modified soil type interpretation for levee body.

削面では、堤体の上部・下部で大きく土質が異なっていたので、堤体の上部と下部に分けて土質区分を行った。

図-32 に距離標6k350~6k850の区間の堤体の比抵抗とS波速度のクロスプロットと土質判定, 図-33に同じく基礎地盤のクロスプロットとその土質判定を示す。堤体では、比抵抗200ohm-m以上の領域は概ね礫質土と判定される。堤体下部では、これまで砂質土と判定していた比抵抗110ohm-m以上のデータも新しい判定では粘性土となることがわかる。同じく基礎地盤でも、比抵抗80~150ohm-mの範囲でこれまで砂質土と判定していたデータの多くが粘性土となることがわかる。

図-34に、新しい土質区分(二次判定)を、小西他(2007)⁸⁾に示されている非破壊調査結果から推定した区分(一次判定)と対比して示す。非破壊調査による一次判定では、距離標6k750~6k800の区間が堤体では「縮まった砂質土」、基礎地盤では「礫質土」と判定されており、この区間の土質が他の区間と異なる可能性があることがわかる。また、距離標6k500~6k550の区間では緩んだ砂質土や粘性土と判定されており、その他の区間と土質が異なる可能性があることがわかる。

開削調査結果では、6k750および6k800の開削面では堤体全体が砂礫であり、他の開削箇所と大きく異なっている。また、6k510および6k540では、堤体下部から基礎地盤に粘性土が存在しており、対象区間(距離標6k350~6k850)の中で最も細粒分が多いことがわかる。また、区間の前半では堤体は上部と下部で異なり、上部は礫質土、下部は粘性土が多いことがわかる。非破壊調査による一次判定と開削調査結果を比べると、距離標6k500~6k550および6k750~6k800の区間で他の区間と土質が異なること、距離標6k750~6k800では礫質土が卓越する点など概略の傾向を捉えていることがわかる。非破壊調査では堤体の土質を砂質土と判定しているが、これは上部が礫質土主体、下部は粘性土主体の堤体を、平均して評価したと考えることができる。

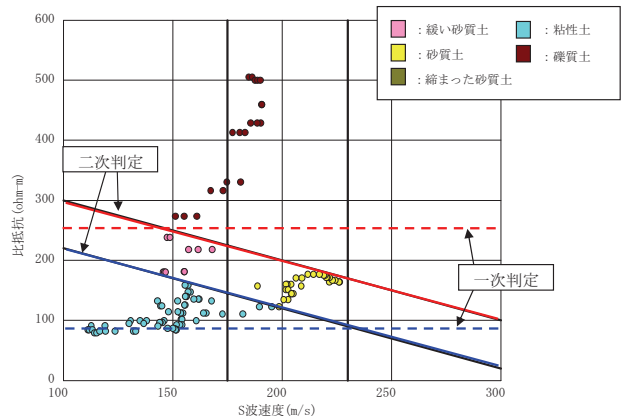
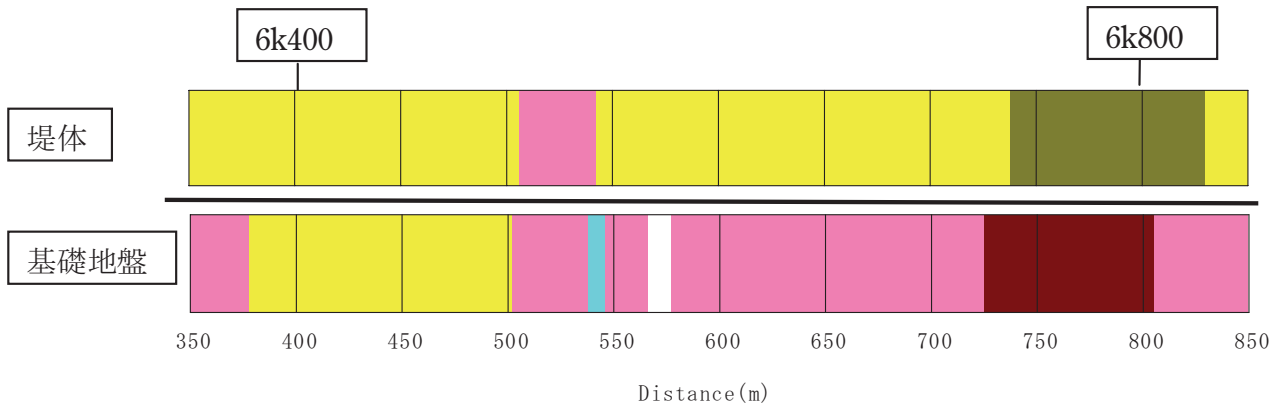
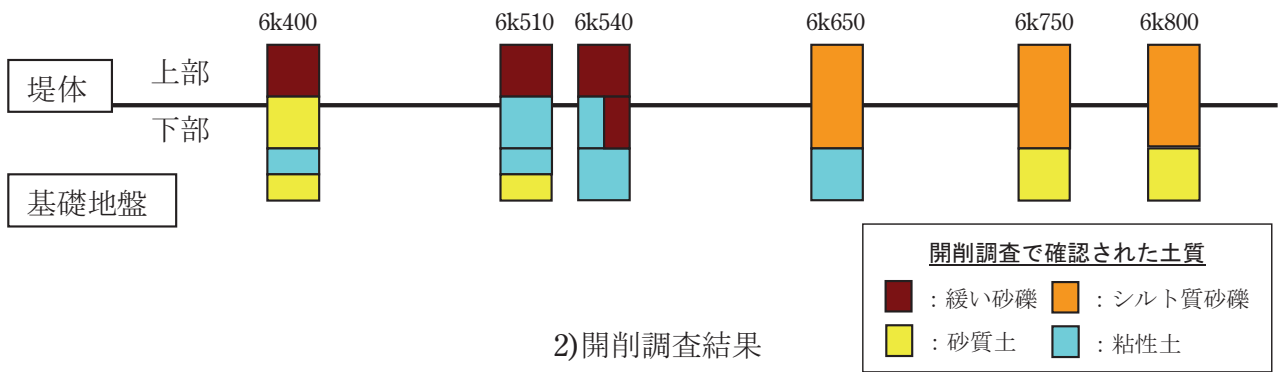


図-33 基礎地盤(深度3.5mまで)のクロスプロット(二次判定)

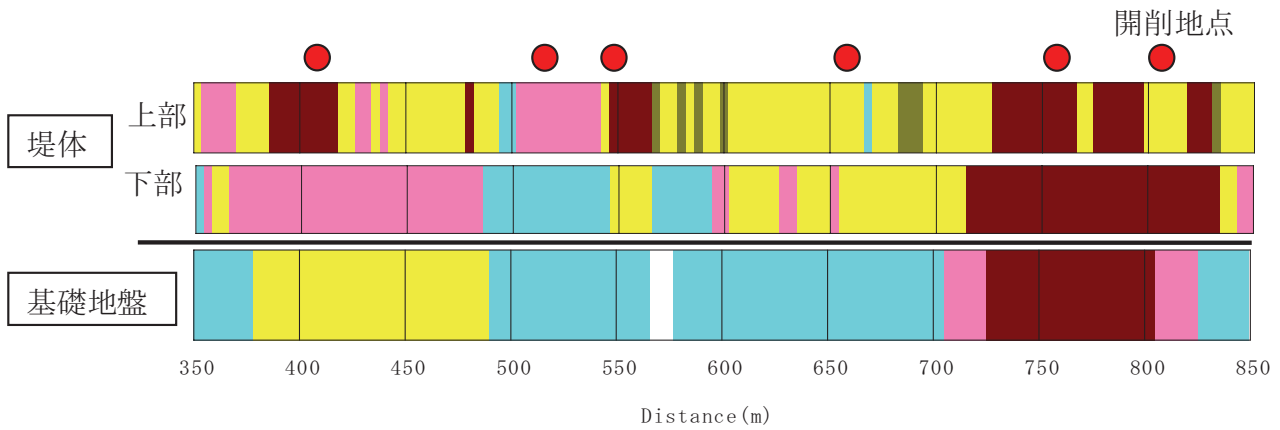
Fig. 33 Crossplot of S-wave velocity and resistivity with modified soil type interpretation for levee foundation (down to depth of 3.5m).



1) 非破壊調査結果による一次判定



2) 開削調査結果



3) 非破壊調査結果の見直しによる二次判定

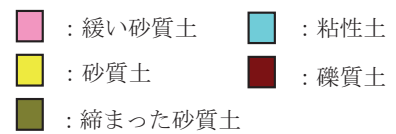


図-34 非破壊調査による堤体および基礎地盤の土質構成の見直し

Fig. 34 Modified soil type interpretation for body levee and foundation in terms of levee excavation.

開削調査結果と非破壊調査の一次判定の違いに着目すると、非破壊調査の結果は粘性土部分を緩い砂質土、礫質土部分を締まった砂質土と評価していることがわかる。この傾向は、図-30 および図-32, 33 に示したように土質境界を左上がりの直線として見直すことにより改善できる。図-34, 3)に見直した土質区分を示す。見直した土質区分は概ね開削調査の結果と整合しており、比抵抗とS波速度のクロスプロットによる土質区分を用いて、堤体や基礎地盤の土質を連続的に把握することが可能であることがわかる。

5. 牽引式電気探査と表面波探査による縦断方向堤防調査手法の適用性の評価

5.1 土質判定に対する適用性

堤体は、人工的に築造されたものであり、その材料や施工時期の違いにより、様々な性状をもつ土が混在する状態にある。牽引式電気探査で得られる比抵抗分布や、表面波探査により得られるS波速度分布は、これらを反映した結果であるが、これらの結果から土質の種類や土質特性等を推定することの難しさはその点にあると言える。

図-35には、牽引式電気探査により得られた比抵抗分布と、開削調査で確認された土質区分とを比較して示したが、これによると、牽引式電気探査の結果からだけでも堤体の土質が上下で異なることや、高比抵抗の部分が砂礫に相当していることなどが推定できる。このことから、牽引式電気探査では、堤体内の複雑な土質分布を反映した平均的な比抵抗値が示されると考えられるが、比較的単純な土質構成では土質に応じた比抵抗値が得られていることがわかる。

堤体の土質に着目して開削調査結果と二次判定結果を対比した結果を表-2に示す。これによると、一部でシルト質砂礫の部分を砂質土と判定しているなど若干の差異は認められるが、ほぼ整合する結果となっている。差異がある部分については、上述したように牽引式電気探査では平均化した比抵抗が求められることによるものと考えられる。

一方、基礎地盤についてみると、一般的には成層構造を呈する場合が多いことから、堤体に比べると、非破壊調査等による推定は容易と考えられるが、地下水が関与することから、非破壊調査により得られる物理量もその影響を受けることを考慮して結果の解釈を行う必要がある。特に、比抵抗は、地下水位以下では低い比抵抗値を示すことから、単独では、土質の判定は難しいことが想定される。したがって、この場合には、上述したように、比抵抗値とS波速度を組み合わせる方法が有効と考えられる。

表-3は、基礎地盤に着目して開削調査結果と二次判

定結果を対比した結果をまとめたものであるが、これによれば両者の整合性はかなり高いことがわかる。

以上より、牽引式電気探査と表面波探査を組み合わせた非破壊調査手法を用いれば、縦断方向の堤体および基礎地盤表層部の土質判定を概略的に迅速に行うことが可能と考えられ、縦断方向の概査への適用に対しては実務的にほぼ満足できるレベルにあると評価できる。実際の調査においては、前述のように比抵抗やS波速度と土質には一意的な関係はないことから、本論文で示したようにボーリングなどで得られる土質情報を利用して、逐次土質判定を見直すことが重要と思われる。

5.2 土質特性の推定に対する適用性

非破壊調査を地盤の透水性や強度の推定に利用することが期待されることから、本研究では牽引式電気探査で得られる比抵抗値と粒径等の物理特性との相関や、表面波探査から得られるS波速度と簡易貫入試験により得られる換算N値との相関性を調べた。

比抵抗値は、土の間隙量や水分量（飽和度）等に主に支配されることから、比抵抗値と物理特性との相関が良好でないことは、当初から予想されたが、ここでは透水係数を推定する際によく利用されている20%粒径 D_{20} と比抵抗値との関係（図-26）に着目してみる。

この図によれば、かなりばらつきは大きいものの、粒径が大きくなるほど、比抵抗値が大きくなるという傾向が認められる。これらのデータを精査し、さらにデータを蓄積することにより、飽和度等をパラメータにした相関関係が求められる可能性を秘めており、今後の課題と考えられる。

一方、表面波探査によって得られるS波速度については、簡易貫入試験から推定した換算N値とはいえ、上述したように両者には良好な相関がみられたことから、従来から用いられているS波速度とN値との関係を用いれば、表面波探査の結果をもとに、概略的な強度の推定を行うことも可能と評価できる。

5.3 河川堤防調査への適用性

非破壊調査の河川堤防調査への適用性について、現時点では以下のような面での利用が期待される。

(1) 浸透に対する安全性評価における区間設定と代表断面の選定への利用

浸透に対する安全性評価に当たっては、堤防沿いの微地形や堤体の土質、基礎地盤の土質等の基礎情報をもとに、検討対象区間を細分し、細分した区間の中から代表断面を選定することになっている。堤体の土質、基礎地盤の土質に関しては、現状限られたボーリング資料等から推定しており、区間設定や代表断面の選定を適切

に行うことは困難な場合も多い。そのような場合に、牽引式電気探査あるいは表面波探査を実施すれば、縦断方向の土質分布を概略的に把握することができ、上記の区間設定や代表断面の選定の際の有益な情報が得られる。

(2) 被災箇所における被災後調査への利用

洪水時に漏水やのり面崩壊等の被災があった場合に

は、原因解明や復旧対策の検討のための調査が行われる。被災後の調査においては、被災した箇所がその上下流部に比べて特異な条件になかったかが調査のポイントになることが多く、縦断方向の土質の変化状況を把握することが重要になる場合が多い。したがって、このような場合にも牽引式電気探査や表面波探査を適用することは有効と考えられる。

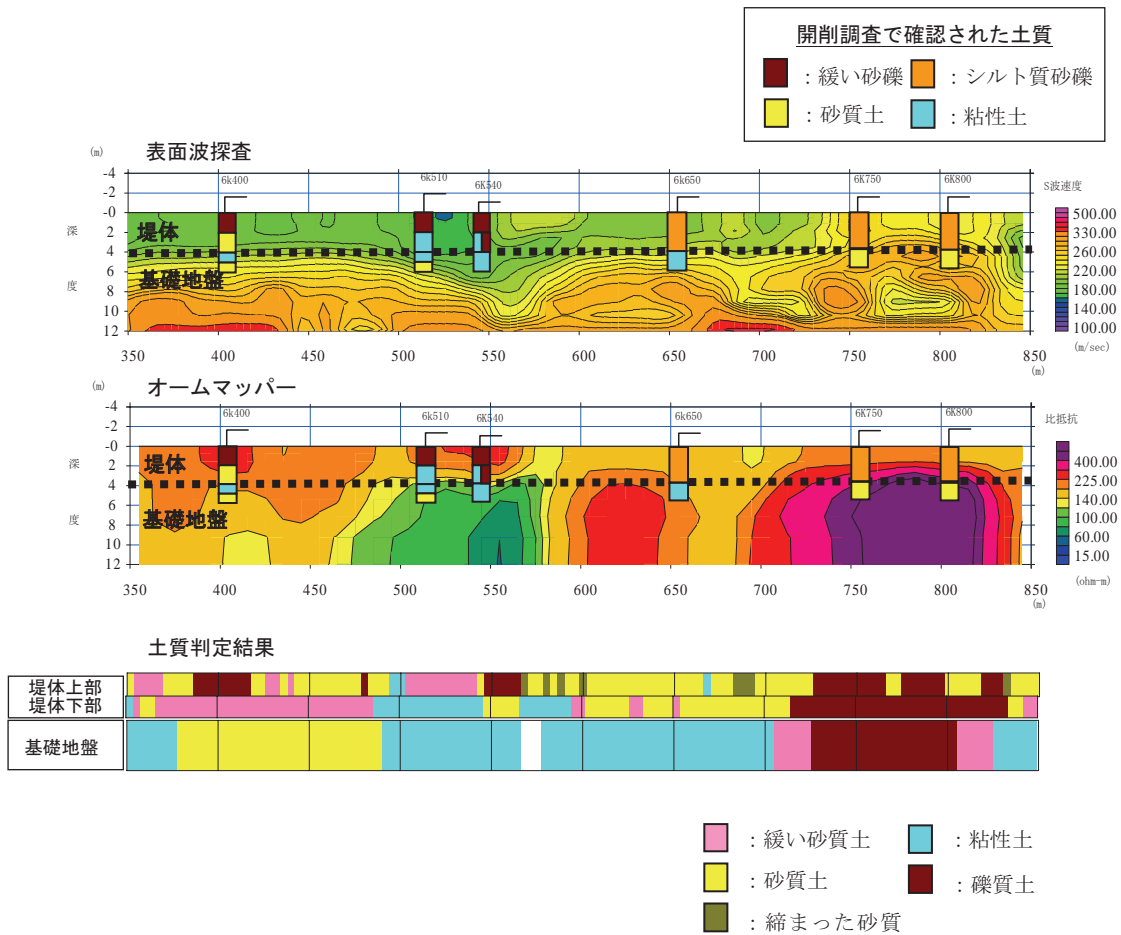


図-35 牽引式電気探査および表面波探査の結果と開削調査結果の対比

Fig. 35 Comparison of capacitive-coupled resistivity system and surface-wave method results with estimated soil type modified by levee excavation.

表-2 非破壊調査結果と開削調査結果との比較（堤体）

Table. 2 Comparison of nondestructive investigations and levee excavation (levee body).

位置	既存資料	非破壊調査結果		開削調査結果
		一次判定	二次判定	
6k400	礫質土	砂質土	上部：礫質土	上部：緩い砂礫
			下部：砂質土	下部：緩い砂質土
6k510	礫質土	緩い砂質土	上部：緩い砂質土	上部：緩い砂礫
			下部：粘性土	下部：粘性土
6k540	礫質土	砂質土	上部：緩い砂質土	上部：非常に緩い砂礫
			下部：粘性土	下部（堤外側）：礫質土 下部（堤内側）：粘性土
6k650	礫質土	砂質土	砂質土	シルト質砂礫
			砂質土	
6k750	礫質土	締まった砂質土	礫質土	シルト質砂礫
			礫質土	
6k800	礫質土	締まった砂質土	砂質土	シルト質砂礫
			礫質土	

表-3 非破壊調査結果と開削調査結果との比較（基礎地盤：堤外側）

Table. 3 Comparison of nondestructive investigations and levee excavation (river side foundation).

位置	既存資料	非破壊調査結果		開削調査結果
		一次判定	二次判定	
6k400	礫質土	砂質土	上部：礫質土	上部：緩い砂礫
			下部：砂質土	下部：緩い砂質土
6k510	礫質土	緩い砂質土	上部：緩い砂質土	上部：緩い砂礫
			下部：粘性土	下部：粘性土
6k540	礫質土	砂質土	上部：緩い砂質土	上部：非常に緩い砂礫
			下部：粘性土	下部（堤外側）：礫質土 下部（堤内側）：粘性土
6k650	礫質土	砂質土	砂質土	シルト質砂礫
			砂質土	
6k750	礫質土	締まった砂質土	礫質土	シルト質砂礫
			礫質土	
6k800	礫質土	締まった砂質土	砂質土	シルト質砂礫
			礫質土	

6. まとめ

桑野川堤防において実施した牽引式電気探査および表面波探査結果について、堤防開削調査等の結果をもとに、河川堤防調査への適用性について評価を行った。得られた知見は以下のとおりである。

- ・開削調査の結果、牽引式電気探査と表面波探査から得られた比抵抗、S波速度および推定した土質は、概ね正しいことが確認された。
- ・河川堤防の調査において、縦断方向の堤体及び基礎地盤表層部の土質分布を概略的かつ効率的に把握するという目的に対しては、牽引式電気探査と表面波探査を組み合わせた調査を実施することにより、実務的に満足できるレベルで適用が可能である。
- ・牽引式電気探査により得られる比抵抗値から物理特

性を推定することは現段階では難しいが、今後良質なデータを蓄積していくことにより、今後の発展が期待できる。

- ・表面波探査により得られるS波速度を用いれば、概略的にN値を推定することが可能であり、強度パラメータの推定等への利用も期待される。
- ・本論文では開削調査結果を用いて土質区分の見直しを行ったが、実際の堤防調査でも同様にボーリングや貫入試験などのデータと併せて解釈することにより、精度良く土質判定を行うことが可能と考えられる。

今後は、本研究で実施したような非破壊調査結果の検証事例をさらに蓄積し、より信頼性の高い非破壊調査手法の確立に努めたい。

謝辞

現場実験を実施するにあたり、国土交通省四国地方整備局四国技術事務所および那賀川河川事務所に現場を提供していただきました。ここに記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 稲崎富士, 河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007): 河川堤防の統合物理探査手法の適用性検討 (その2) - 千曲川堤防における統合物理探査 -, 物理探査学会第 116 回学術講演会講演論文集, pp.112-115.
- 2) 渡辺文雄, 河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007): 河川堤防の統合物理探査手法の適用性検討 (その1) - 河川堤防健全度評価への統合物理探査の役割とコンソーシアムの取組み -, 物理探査学会第 116 回学術講演会講演論文集, pp.277-280.
- 3) 高橋亨・田中莊一, 山本剛・糸川政孝・船曳誠二, 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 (2007): 河川堤防の内部構造調査と探査機器の開発研究 (その1)- 研究の全体計画と平成 18 年度研究成果の概要 -, 物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集, pp.119-122.
- 4) 林宏一・鈴木晴彦・斎藤秀樹 (2001): 人工振源を用いた表面波探査の開発とその土地質調査への適用, 応用地質技術年報, No.21, pp.9-39.
- 5) 小西千里・林宏一, 山下善弘 (2006): 電極棒を用いない牽引式電気探査手法「オームマップ」の適用実験と今後の展開, 応用地質技術年報, No.25, pp.47-60.
- 6) 岡田聡, 林宏一, 泊耕一, 井上宗雄, 藤野隆, (2003): 表面波探査の河川堤防への適用例, 第 38 回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.39-40.
- 7) 小西千里・林宏一・田中敏彦・三明崇史 (2006): 牽引式電気探査手法 (OhmMapper) を用いた堤体土質の把握について, 物理探査学会第 114 回学術講演会講演予稿集, pp.242-245
- 8) 小西千里, 林宏一, 阿部知之, 田中敏彦, (2007): 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.
- 9) 稲崎富士 (1998): 「ランドストリーマー」を用いた都市域での高分解能 S 波反射法探査, 物理探査学会第 98 回学術講演会論文集, pp.114-117.
- 10) 関沢元治, 佐藤伸吾, 中山修, 鈴木善友, 勝山明雄, 小松田孝寿, 杉浦達也, 太田史朗, 平塚智幸 (2004): 宮城県北部地震による河川堤防被害調査について, 河川技術論文集, Vol.10, pp.261-266.
- 11) 田中敏彦・藤村尚・植田光明 (2006): 牽引式電気探査 (オームマップ) による堤防評価の一例, 第 41 回地盤工学研究発表会, pp.131-132
- 12) 林宏一・稲崎富士・河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007a): 河川堤防の統合物理探査手法の適用性検討 (その3) - 物理探査情報の河川堤防評価への利用 -, 物理探査学会第 116 回学術講演会講演論文集, pp.116-119.
- 13) 桑野川航空写真 撮影: 平成 16 年 4 月 縮尺 1:6500 国土交通省四国地方整備局 那賀川河川事務所.
- 14) 林宏一, 稲崎富士, 河川堤防の統合物理探査適用検討委員会 (2007b): 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討 (その5) - 削開面における S 波速度測定による表面波探査結果の検証 -, 物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集, pp.111-114.
- 15) 松尾公一, 徳丸哲義, 河川堤防の統合物理探査適用検討委員会, 稲崎富士, 中西利典 (2007): 河川堤防への統合物理探査法の適用性検討 (その6) - 比抵抗・表面波探査結果と堤体物性の対比 -, 物理探査学会第 117 回学術講演会講演論文集, pp.115-118.
- 16) Imai, T. and Tonouchi, K. (1982): Correlation of N-value with S-wave velocity and shear modulus, Proceedings of the second European symposium on penetration testing, pp.67-72.