

# 港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE  
OF  
THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

**No.1247**      March 2012

空港用地内における液状化被害予測のための物理探査事例

菅野 高弘  
中澤 博志  
小濱 英司

独立行政法人 港湾空港技術研究所

Independent Administrative Institution,  
Port and Airport Research Institute, Japan

## 目 次

要 旨 .....	3
1. はじめに .....	4
2. 物理探査の概要 .....	4
2.1 波動の種類と特徴 .....	5
2.2 地盤のS波速度を決定する諸因子 .....	5
2.3 高密度表面波探査 .....	6
2.4 小規模微動アレイ .....	8
2.5 電気探査 .....	9
3. 滑走路地盤の物理探査適用事例 .....	10
3.1 石狩湾新港 .....	10
3.2 新潟空港 .....	12
3.3 松山空港 .....	14
3.4 宮崎空港 .....	17
3.5 東京国際空港 .....	20
4. 被災予測への適用 .....	25
4.1 松山空港における簡易液状化抵抗評価 .....	25
4.2 東京国際空港における簡易液状化抵抗評価 .....	27
5. まとめ .....	28
6. おわりに .....	29
謝辞 .....	29
参考文献 .....	29

# Case Studies on Estimation of Liquefaction Damage by Geophysical Exploration in Airport Site

**Takahiro SUGANO\***  
**Hiroshi NAKAZAWA\*\***  
**Eiji KOHAMA\*\*\***

## Synopsis

In the airport where various facilities are installed, it is feared that their function will be suspended when the ground in airport site is liquefied by large earthquake. Especially, runway pavement of which performance needs bearing capacity and keeping allowable surface deformation after an earthquake, will be damaged due to differential settlements with deformation of the ground induced by liquefaction. In this case, it is thought that there is a possibility to stop the present serviceability of runway even if damage to runway pavement structure is locally caused by liquefaction. This paper describes investigations to estimate damages to runway pavement ground induced by liquefaction using geophysical exploration which were used as a technique for an interpolation of the existing geological information.

**Key Words:** Runway, taxiway, liquefaction, surface wave exploration, electrical prospecting, min-Array Microtremor measurement

---

\* Director for Special Research  
\*\* Researcher, Earthquake and Structural Dynamics Team, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
\*\*\* Team Leader, Earthquake and Structural Dynamics Team, Earthquake Disaster Prevention Engineering Division, Geotechnical and Structural Engineering Department  
3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan  
Phone : +81-46-844-5058 Fax : +81-46-844-5039 e-mail:sugano@pari.go.jp

# 空港用地内における液状化被害予測のための物理探査事例

菅野 高弘\*・中澤 博志\*\*・小濱 英司\*\*\*

## 要 旨

多様な施設が設置されている空港では、地盤が液状化した場合、様々な施設が機能しなくなることが懸念される。特に、地震後において平坦性かつ所定の支持力が要求される滑走路では、液状化による地盤変状に伴う不同沈下等の被害が予測されるが、被害が局所的であっても全面的に供用ができない可能性が高いと考えられる。滑走路における局所的な変状や不同沈下量を予測するためには、事前に地盤の状況を詳細に把握しておく必要があるが、敷地内において平面的に点の調査であるボーリング調査では限界がある。そこで、本報では、滑走路地盤を対象とした既存ボーリング調査結果の補間手法として、幾つかの物理探査を実際の滑走路地盤で実施した。

空港内の滑走路や誘導路上で実施した物理探査手法は、表面波探査、小規模微動アレイ探査および電気探査であり、既存ボーリング調査結果を確認の上、液状化層の連続性と工学的基盤までの地盤モデル作成に向けた層序の概略把握、埋立て時に埋設された既存の構造物の把握、埋立て施工履歴の確認および地盤改良範囲の確認等を主な目的とした。表面波探査結果より、GL-10～15mの範囲において液状化層の連続性を把握するとともに、工学的基盤がそれよりも深い場合、小規模微動アレイ観測結果を併用することで地盤モデル作成が可能なこと、旧海岸線において埋没していた既存構造物の把握が可能なこと、および地盤改良範囲についての概略把握をすることが出来た。また、表面波探査および電気探査結果より、簡易な液状化抵抗評価を実施し、地盤の概況を概ね把握することが出来、滑走路の様な長手の構造物に対し、概略判定が可能であることを示すことが出来た。

**キーワード**：滑走路，誘導路，液状化，表面波探査，微動アレイ，電気探査

---

\* 特別研究官

\*\* 地震防災研究領域耐震構造研究チーム特別研究員

\*\*\* 地震防災研究領域耐震構造研究チームリーダー

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5058 Fax：046-844-5039 e-mail:sugano@pari.go.jp

# 1. はじめに

広大な敷地上に建設されている空港は、地盤が液状化した場合には、様々な施設が機能しなくなることが懸念される。過去の空港における被害事例を見ると、1964年の新潟地震が液状化被害の最も顕著な事例である。当時の新潟空港では、ターミナルビルが液状化に伴う地盤の支持力の消失により、約1mの沈下が生じ階下が浸水したことや、写真-1に示すように、滑走路において、液状化に起因する滑走路の亀裂や不同沈下の発生が確認され、特に海岸沿いのB滑走路では、日本海側に向かって滑走路中央付近に4.5m程度の湾曲が生じる等の被害が生じた<sup>1)</sup>。このように、滑走路の被害については、地盤変状に起因する滑走路のクラック、段差が生じると、一部であっても滑走距離が確保できず全面的に供用ができない可能性があり、地震時の定量的な被災予測や合理的な液状化対策が重要であることを物語っていると云える。

また、1995年の兵庫県南部地震の各種甚大な被害によって、近年、耐震設計において2段階の地震動（レベル1、レベル2地震動）を考慮し、従来の耐震設計思想とは異なり、構造の安定だけでなく施設の機能に着目する等が求められるようになってきた。空港においては、空港土木施設耐震設計要領<sup>2)</sup>に、レベル2地震後における各種構造物の要求性能が規定されており、図-1に示す流れで液状化対策が考えられている<sup>3)</sup>。液状化対策策定に当たっては、事前の地盤情報を広域的かつ詳細に把握し、地震時被災予測精度の向上が非常に重要である。

液状化対策を考える上で、実際に空港敷地内で液状化が起こった際に、どのような影響が空港施設に生じるかを確認するため、平成19年10月に北海道小樽市の石狩湾新港において、実物大の空港施設を用いた人工液状化実験が実施された。この実験では、様々な試みがなされたが、その中で、滑走路における地震後に生じる局所的な変状や不同沈下量を予測するため、敷地内において点の



写真-1 新潟空港における滑走路の被災状況

調査であるボーリング調査では限界があることから、物理探査手法やサウンディングを用いた地盤のばらつきや地層断面の空間補間が検討された<sup>4)</sup>、<sup>5)</sup>。これらの手法は、地層断面の補間のみならず、液状化前後の地盤の物性変化まで捉える事ができ、空港用地において有効な補助調査手法であることがわかった。これらの成果を受け、滑走路の耐震化検討において、既存ボーリング調査間の液状化層の連続性及び層厚変化をなるべく迅速かつ正確に把握するため、高密度表面波探査が用いられてきている<sup>6)</sup>。本論文では、液状化層相当層の分布や連続性把握、地下埋設物確認および地盤改良範囲確認等を目的とした滑走路における物理探査事例についてまとめ、滑走路の液状化被害予測に向けての検討・考察を行った。

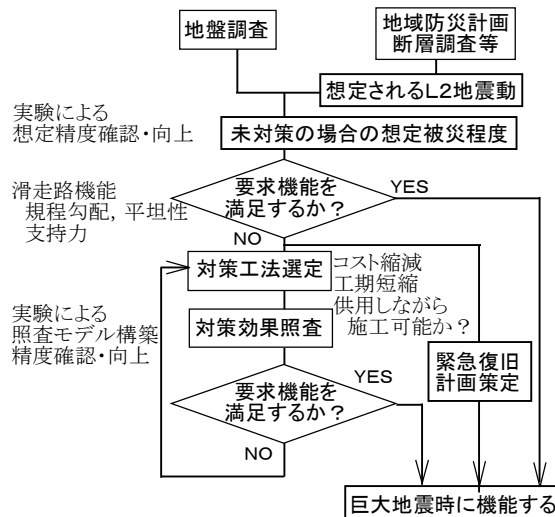


図-1 液状化対策策定フロー（文献3に加筆）

## 2. 物理探査の概要

空港用地内で実施した物理探査手法は、主に高密度表面波探査、小規模微動アレイおよび電気探査であり、非破壊・非侵襲で地盤の力学的性質を把握する補助的探査技術であり、それぞれの目的を表-1に示す。なお、表中には、探査実施時期も併記されているが、本報告の取りまとめ結果については、実施当時の断面であることに留意されたい。

表-1に示す探査手法は、基本的に既存ボーリングデータがあり、地層の概略がある程度把握できていること、通常、滑走路は供用中の施設であるため、夜間の短時間に実施できることが前提となる。以下に、各々の探査原理と探査手法の概略について述べる。

表-1 物理探査事例

現場	実施時期	物理探査手法	目的
石狩湾新港	H19.10	表面波探査	滑走路直下地盤の液状化前後の物性値変化把握
新潟空港	H20.8	表面波探査, 電気探査	施工履歴, 地盤改良範囲確認, 液状化層の連続性把握
松山空港	H21.2	表面波探査, 微動アレイ, 電気探査	施工履歴確認, 液状化層の連続性把握
宮崎空港	H22.2	表面波探査, 微動アレイ	液状化層の連続性把握
東京国際空港	H22.12	表面波探査, 微動アレイ, 電気探査	地盤改良範囲の確認

2.1 波動の種類と特徴

(1) 波動の種類と特徴

最初に、波動の種類と特徴について述べる。地震波は複数存在し、伝搬現象は図-2および図-3に示す通りそれぞれ異なっている。P波、S波の実体波は、物質内を伝播する波動であり、境界波は物質の境界を伝播する波動である。表面波は、自由面に接する物質内を伝播する境界波の一種であり、地球表面においてもレイリー波やラブ波という表面波が存在する。実体波と境界波の大きな違いは、実体波は分散性を有しないが、境界波は分散性を有するという点である。波動の分散性とは、周波数によって波動の伝播速度が変わるということである。

図-4に示すように、より身近な例について説明する。地表には、人為的な振動や自然に起因する様々な波動が常時伝播しており、特に震源を特定できない微小な振動を微動と称している。この微動は、実体波や表面波からなり、微動の波動現象には、発生源、伝播経路、地下構造などによる様々な影響因子を包含している。人為的な微動は、一般的には車輛振動に起因し、周期1秒以下であり、振幅に明瞭な日変化が認められる特徴がある。自然現象に起因する波動は周期1秒以上の波で、主として気圧変化に伴う風や波浪等の自然現象が発生源であり、それらの現象の規模によって振幅は変化している。地表の微動は、多くの場合、表面波が優勢である。表面波は実体波と異なり、地盤を伝わる速さが周波数によって変化する性質（位相速度の分散現象）がある。この表面波の分散特性は地下構造を正確に反映する。分散特性は、地下のS波速度構造の違いによって明瞭に異なり、表面波の分散特性がわかれば地下構造を推定できることになる。

2.2 地盤のS波速度を決定する諸因子

既往の研究において、S波速度を土質工学的指標により推定するための関係式が数理化理論に基づき提案されている。その多くは、N値、深度、地質年代および土質区分を説明変数として、実測値との比較により構築され

ているものである。予測式について、太田・後藤<sup>7)</sup>により、15種類の実験式が紹介されている。上記のすべての項目を含む予測式として以下の式が挙げられ、各土質毎のS波速度の概略把握が可能である。

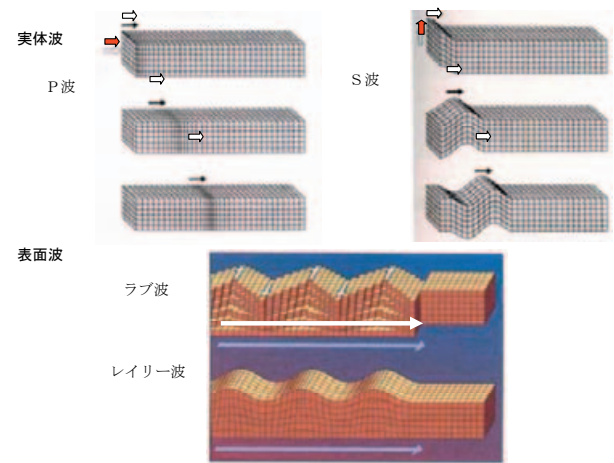


図-2 波動の模式図

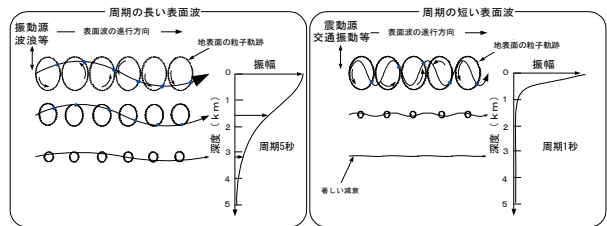


図-3 表面波(レイリー波)の特徴

$$V_s = 68.79N^{0.171}H^{0.199} \left( \begin{matrix} 1.000 \\ 1.086 \\ 1.066 \\ 1.303 \\ 1.135 \\ 1.153 \\ 1.448 \end{matrix} \right)_{\text{GeologicalEpoch}} \left( \begin{matrix} 1.000 \\ 1.086 \\ 1.066 \\ 1.135 \\ 1.153 \\ 1.448 \end{matrix} \right)_{\text{SoilType}} \quad (1)$$

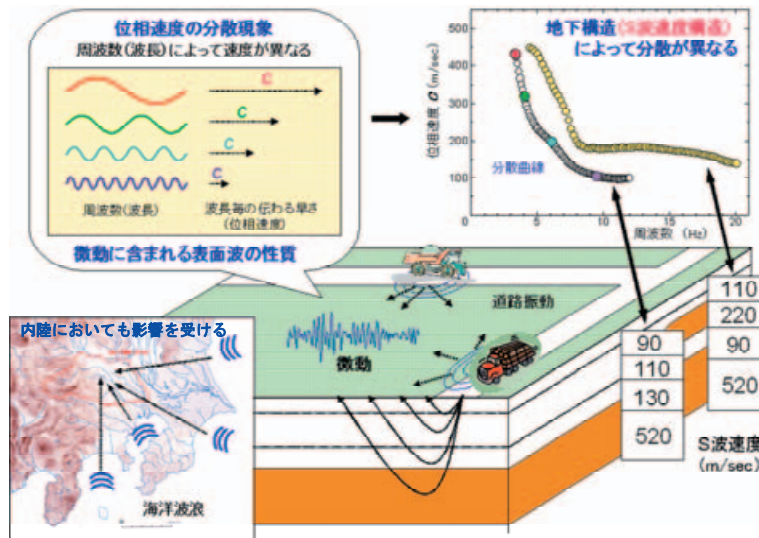


図-4 表面波探査の模式図

ここに、 $N$ は $N$ 値、 $H$ は深度(m)を示し、

$$\begin{pmatrix} \text{沖積} \\ \text{洪積} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.303 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} \text{粘土} \\ \text{細砂} \\ \text{中砂} \\ \text{粗砂} \\ \text{砂礫} \\ \text{礫} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1.000 \\ 1.086 \\ 1.066 \\ 1.135 \\ 1.153 \\ 1.448 \end{pmatrix}$$

とする。また、今井ら<sup>8)</sup>は、より簡略的に砂質土の $V_s$ と $N$ 値の関係式が次式の様に示されている。

$$V_s = 97.0N^{0.314} \quad (3)$$

なお、これらの式の適用にあたり、予め既往ボーリングデータの検討により探査現場における適用性を検討し、諸係数について適切な設定をする必要もあると考えられる。

## 2.3 高密度表面波探査

### (1) 計測方法

本手法は、一般に深度10~15m付近までの地盤のS波速度構造を二次元的に把握することができる物理探査手法であり、滑走路と同様に延長の長い構造物である河川堤防では比較的多く用いられている。探査方法としては、

図-5に示す様に、1m間隔で受振器24個を測線上に設置し、測線の端から1m離れた位置で、カケヤにより人力で地表をたたき、その際に伝わる波を測定した。写真-2に受振器とカケヤによる起振の様子を示す。一回打撃が終了すると、測線上に2m移動し、同様に打撃・測定を繰り返した。作業順序のまとめを以下に示す。

#### 1) 受振器・ケーブルの設置

位置出しによって設けた受振点の位置に受振器を設置し、受振器と観測本部の測定器との間を多芯ケーブルで接続する。受振器には4.5Hzの速度形ジオフォンを用い1m間隔で設置した。

#### 2) 起振点の準備

起振は2m間隔で、カケヤを用いて行った。

#### 3) 起振、観測

風などのノイズが小さい時を見計らい、測定本部の合図により起振した。発生した弾性波は、地中を伝播し各受振点で受振される。各受振点での受振された振動は、受振器において電気信号に変換され、多芯ケーブルを介して測定器に入る。データはA/D変換された後、測定器に内蔵されているハードディスクに収録した。

#### 4) 移動

一つの起振点において起振を終了後、起振点と受振点をそれぞれ2m移動して測定を行った。以上の測定を測線の終点まで繰り返した。

測定される表面波は、長い波長ほど深部の地盤特性を反映し、短い波長では位相速度が遅く、長い波長では位相速度が速くなる特徴を有する。図-6に解析の流れを示すが、波長による伝播速度の違いである分散を逆解析す

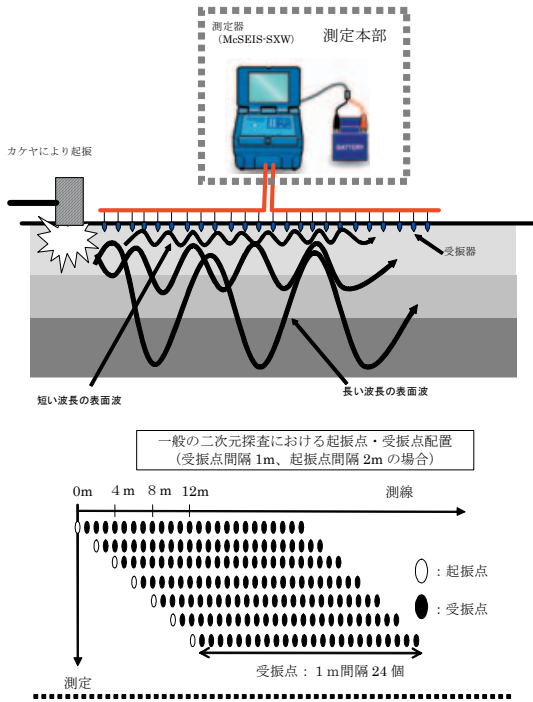


図-5 高密度表面探波查起振点・受振点配置図



(a) 受信器 (速度計)



(b) 起振状況

写真-2 高密度表面探波查の様子

ることにより、不均質な地盤のS波速度構造を求めることができる。波形記録の一例と分散曲線を図-7と図-8にそれぞれ示す。特に、空港滑走路上で観測位相速度は、滑走路舗装・路盤の剛性が高いために、表層を打撃して得られる表面波では、高次モードを含む様々な形態の観測位相速度が得られることがある。図-8における原地盤の事例の様に、通常は周波数が大きくなると位相速度が低下してくるが、滑走路上の探査から得られた分散曲線の例では、不連続な逆分散と観測位相速度が得られており、高次モードを考慮した解析が必要となることがある。

(2) 高次モードを考慮した解析概要

上述の通り、表面波探査は複数の受振器（多チャンネル）を使用して測定を行い、これにより複数のモードを分離することが可能となる。図-9に示すように、深くなるほどS波速度が速くなる地盤では、低周波ほど速度が速く、高周波ほど速度が遅い分散曲線が得られることとなり、これを基本モードと呼ぶ。しかしながら、表層のS波速度が高速度である地盤構造、あるいは、S波速度が高速度の層が挟在し、その直下のS波速度が遅い地盤構造等、いわゆる速度の逆転層が存在する複雑な地盤においては、顕著に高次モードと思われる波が発生し、複雑な分散曲線となることが知られている。

図-10は、表層にS波速度の速い層を仮定した速度構造モデル（左図）に対して理論波形を算出し、それを周波

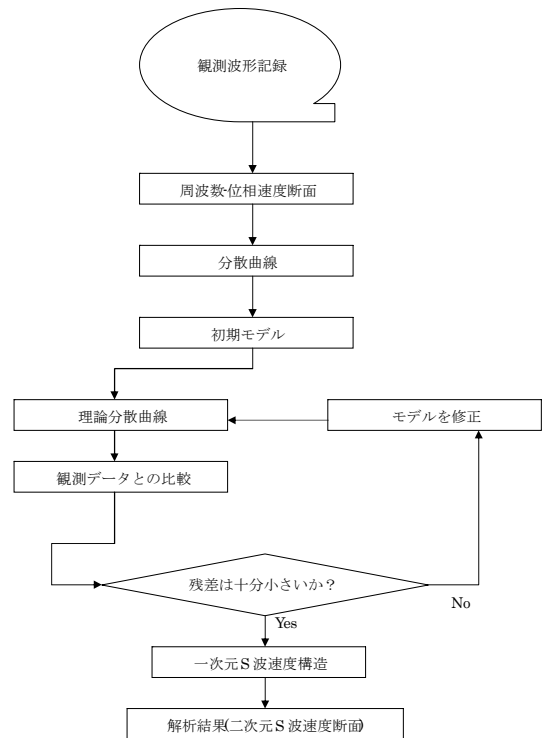


図-6 表面波探査解析の流れ

数領域での位相速度イメージを示した位相速度断面を示す。図-11と異なり、高周波ほど速度が速くなる逆分散で、



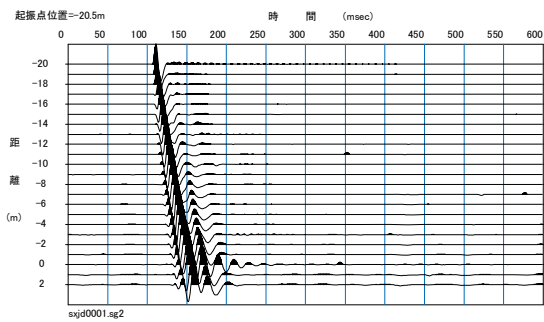


図-7 観測波形記録例

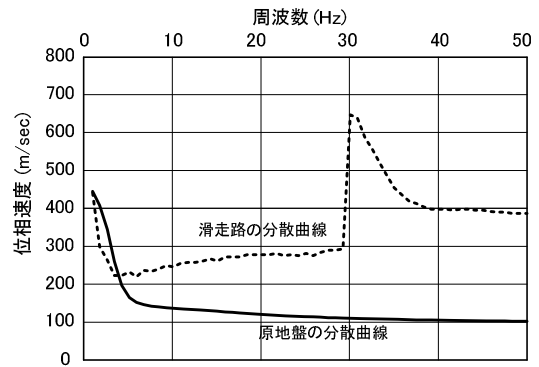


図-8 観測位相速度の例

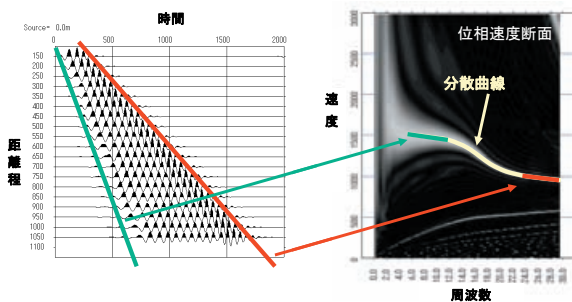


図-9 分散曲線の例

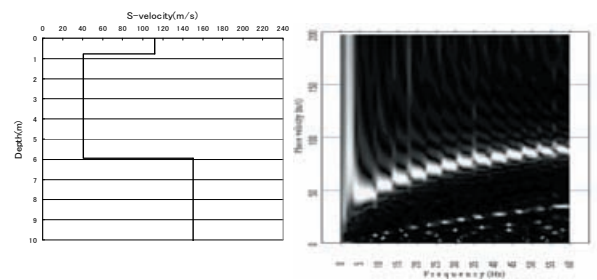


図-10 S波速度モデルと理論波形(位相速度断面)

分散曲線も不連続となっていることから、基本モードでは説明が出来ないこととなる。

次に、図-11に正規モード解における各モードの位相速度(実線)と振幅(破線)を算出し、図-10に重ね示す。同図より、観測された分散曲線は、各周波数で振幅が最大となるモードの位相速度(○印)とよく一致していることが分かる。また、分散曲線の不連続は、最大振幅のモードが移り変わる際に生じていることも見て取れる。

以上より、想定した速度モデルに対し、正規モード解で算出した各周波数における最大振幅となる高次モードの位相速度を理論分散曲線と考え、これが観測された分散曲線に合うようにモデルを修正し、実地盤のS波速度構造の推定が可能である。なお、解析にあたっての速度構造初期モデルは、既存ボーリング調査結果等を基に作成するため、事前調査結果の入手が必要である。特に、PS検層結果、S波速度と相関があるN値、地層区分等が基本的な情報となる。

## 2.4 小規模微動アレイ

既往ボーリングデータにより、高密度表面波探査の探査可能深度以深において、液状化層が連続していることが予想される場合や深い位置にある工学的基盤( $V_s \geq 300\text{m/s}$ )を把握する場合、本手法を用い、一次元のS波速

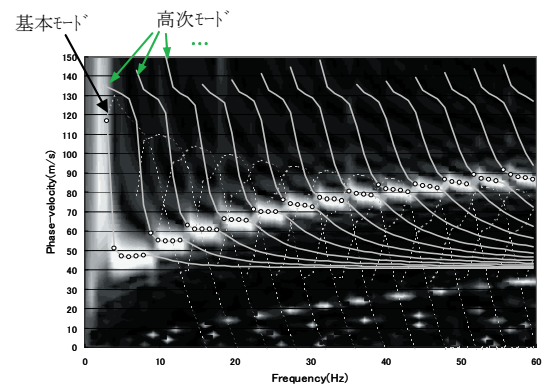


図-11 正規モード解における位相速度(実線)と振幅(破線)

度構造を求めた。図-12に示す様に、正三角形のアレイを三つ組み合わせたものを用い、アレイサイズ(正三角形の底辺長)は、探査深度に応じて設定するが、最大数十m(ここでは60mとした)としている。レイリー波の波長と探査深度の関係については、波長が長い波動は、深部の影響を反映していることになるが、簡単にまとめると、軟弱地盤では「S波速度が小さい(波長が長い)」ので、アレイサイズを大きくする。一方、大深度では「周波数が低い(波長が長い)」となり、アレイサイズを大きくする等の対応が現場で求められることがある。

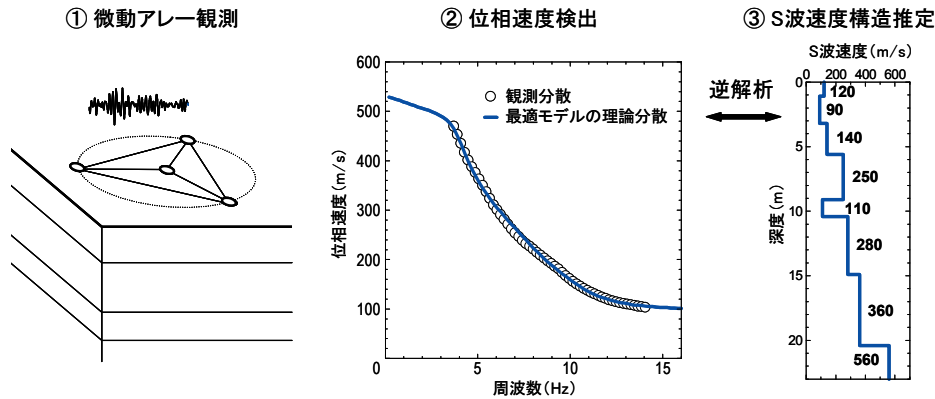


図-12 微動探査の原理

1回のデータ収録時間は約32秒として20回の測定を行い、得られたデータより分散曲線を求め、数十mの深度までの一次元S波速度構造を求めた。なお、観測実施にあたり、既存のボーリング柱状図と同一箇所における整合性を確認し結果を得るのが望ましいと考えられる。

## 2.5 電気探査

### (1) 計測方法

電気探査は、地盤材料の電気的な特性の違いを探査し、土質の分布範囲の推定を目的とする手法であり、試験的に適用した。通常の電気探査では、電極棒を地盤に打ち込む必要があり、滑走路上での実施が不可能であるため、本研究では、キャパシタ電極と呼ばれる原理を用いた探査手法<sup>9)</sup>を滑走路から試みた。

なお、キャパシタ電極とは、測定系と地盤との間でコンデンサーを形成することによって、地盤に非接触で電流を流して地盤の比抵抗値を測定する手法である。キャパシタ電極を用いる電気探査では電極棒を地盤に打ち込む必要がないため、従来の電気探査と比較して迅速な測定作業が可能であり、なおかつアスファルト舗装道路などの既存構造に損傷を与えることなく測定が可能であるという特長がある。キャパシタ電極による電気探査の概念図を図-13に示す。地盤とは絶縁された平板電極に電圧をかけると、地盤をもう一方の平板としたコンデンサーが形成される。このコンデンサーに交流電圧を印加することで、平板電極と地盤が形成するコンデンサーを用いたCR回路と等価となり、地盤に非接触で連続的に電流を流すことができる。同様の原理で地盤の電位を測定することができるので、通常の電気探査同様、地盤の比抵抗値を測定することが可能である。

図-14に測定系を示す。本手法は、特徴として電極部に平板電極ではなく、ダイポールケーブルと呼ばれるもの

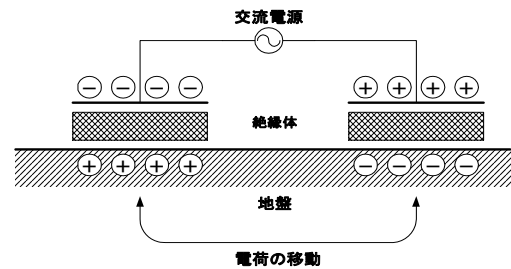


図-13 キャパシタ電極を用いた電気探査

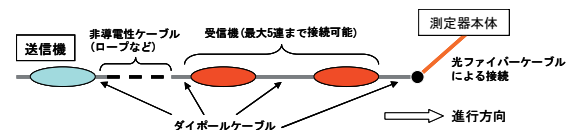


図-14 電気探査概要

を用いていることが挙げられる。ダイポールケーブルとは同軸ケーブルのシールド線に16.5 kHzの交流電圧を印加するもので、このシールド線がコンデンサーにおける平板電極に相当する。ケーブルの絶縁性被覆部が、コンデンサーにおける誘電体の働きをする。このダイポールケーブルを送信機に2本、受信機に2本それぞれ接続する。電極配置は一般的な電気探査におけるダイポール・ダイポール電極配置と等価となる。探査深度のコントロールは、このダイポールケーブルの長さ、送受信機の間隔を調節することにより行う。例えば、松山空港における探査深度はGL-10mとなるように調整した。現システムでは、受信機は最大で5チャンネルまで接続することができ、同時に5深度の測定が可能となっており、写真-3の様に測定をしながら測線を進むため、迅速な測定作業が可能である。表-2に比抵抗値と地盤材料の物性値の関係を示す。

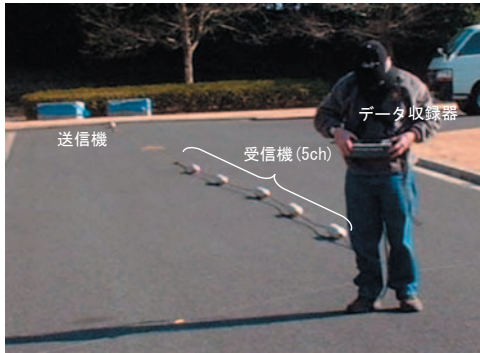


写真-3 電気探査の様子

表-2 各土質パラメータと非抵抗値の関係

小	-----	電気比抵抗	-----	大
~1		$\Omega \cdot m$		$10^3 \sim$
(粘土)	(シルト)	(砂)	(砂礫)	
小	-----	粒 度	-----	大
大	-----	飽 和 度	-----	小
大	-----	体積含水率 (空隙率×飽和度)	-----	小
小	-----	地層比抵抗	-----	大

## (2) 探査深度

本手法の探査深度については、等価なダイポール・ダイポール配置の電気探査で考えることにする。ダイポール・ダイポール配置の電気探査の場合、見掛比抵抗は便宜的に式(1)で表される見掛深度 $Z(m)$ にプロットされている。各深度の見掛比抵抗の値をこの深度にプロットして断面としたものが、見掛比抵抗擬似断面図である。

$$Z = \frac{a(n+1)}{2} \quad (4)$$

ここに、 $a$ : ダイポール長(m),  $n$ : 隔離係数

経験的には、逆解析により得られる比抵抗モデルは、見比抵抗擬似断面図で得られる構造よりも、浅い構造を反映している。そのため、通常の電気探査では、対象とする深度の1.5倍の探査深度まで測定を行っている。また、深度が深くなるほど測定精度が悪くなるため、本手法の探査深度としてはダイポール長と最大の隔離係数で決まる最大の見掛深度の概ね半分程度と考えている。

$$(\text{探査深度}) \approx (\text{最大見掛深度}) \times 0.5 \quad (5)$$

浅部の感度については、例えば2.5mのダイポールケーブルでロープ長を2.5mとしたときの隔離係数は、図-15に示す様に、対応する電極棒の位置から2となることがわ

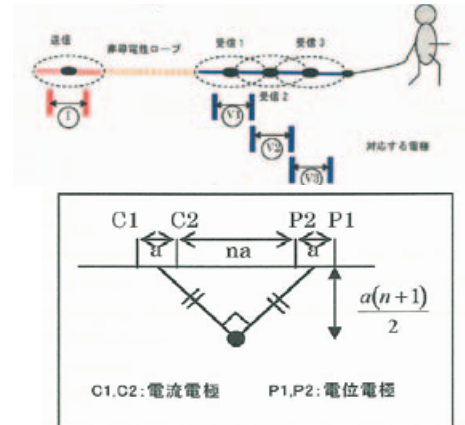


図-15 ダイポール間の見かけ深度

かる。このとき、 $Z$ は3.75mとなり、探査深度としては約1.8m程度となる。一方、2極法の探査深度は、およそ電極間隔と等しいと考えられているため、電極間隔が1mの時の探査深度は1mである。最小となる探査深度が小さいほうが、浅部の感度が高いと考えられるため、この場合、本手法よりも2極法の方が表層部の感度が高くなる。

## 3. 滑走路地盤の物理探査適用事例

本研究における滑走路地盤の液状化層の把握や液状化対策策定を目的とした物理探査の実施事例について以下に述べる。

### 3.1 石狩湾新港

空港土木施設の耐震性や液状化対策について検討するため、実大施設を現場に施工し、制御発破により地盤を液状化させ、液状化に伴う実際の被害状況を確認した。なお、プロジェクト全体については参考文献<sup>3),4)</sup>に詳しく報告している。また、当該実験において種々の探査手法を試行している。

図-16に示す様に、50m×60mの実際の滑走路と同じ設計仕様のアスファルト舗装を敷設し、滑走路地盤の各所に密度増大工法および薬液注入工法による地盤改良が施工された。なお、滑走路地盤の概略として、発破実験で液状化層に設定した地下水面からGL-10mまでの範囲では、主たる層を成しているFs層でN値が概ね1~8、細粒分含有率 $F_c$ が5.3~34.0%を示し、液状化しやすい土質である。また、液状化させるための制御発破は、地盤改良箇所を除き装薬箇所が平面的に6mピッチ、深度方向にはGL-4.5mに2kg、GL-9.0mに4kgの爆薬を設置し0.25s間隔で発破した。高密度表面波探査については、実験サイト内

に7測線実施されたが、そのうち、アスファルト上におけるA-A'測線における地盤改良範囲の確認と発破により生じた液状化前後におけるS波速度の変化について述べる。

図-17に発破前後における水平2m、鉛直は浅層で0.5m、深部で1mのメッシュによるS波速度の2次元分布と発破1

日、3日および7日後におけるアスファルト舗装の沈下量分布を示す。なお、アスファルト舗装の沈下挙動に関しては、発破1日後と7日後の沈下量分布が同じであることがわかる。

発破前のS波速度分布を見ると、密度増大工法範囲の右端である距離程10mから60mにかけてのGL-6m以浅において、150m/s以下の $V_s$ が比較的低い層が連続している。この連続層の分布において、距離程17~36mおよび47~60mの範囲で、 $V_s \leq 120$ m/sの低S波速度分布が見られる。特に、距離程17~36mでは、薬液注入工法を含む範囲が存在するが、本工法は、土粒子間隙の地下水を薬液に置換する工法であり、密度は地盤改良前とほぼ変化していないと考えられる。また、密度増大工法を含む距離程0~15mについては、地盤改良前にはFs層およびAs1層が連続していることから、この範囲の低S波速度層の途切れは、地盤改良による密度増加を捉えているものと推察される。

続いて、発破前後のS波速度分の比較をすると、全体的な傾向として、距離程10~60m、GL-6m以浅においてS波速度の増加が見られ、特に、距離程17~36m、45~50mにおける増加が著しい。アスファルト舗装の沈下量分布を見ると、地盤改良体間である距離程15~24m、未改良部分における距離程36mから60mに向かい、アスファルト舗装の沈下が大きくなる。距離程15~24mや未改良範囲である45~50mの区間に関しては、過剰間隙水圧の消散

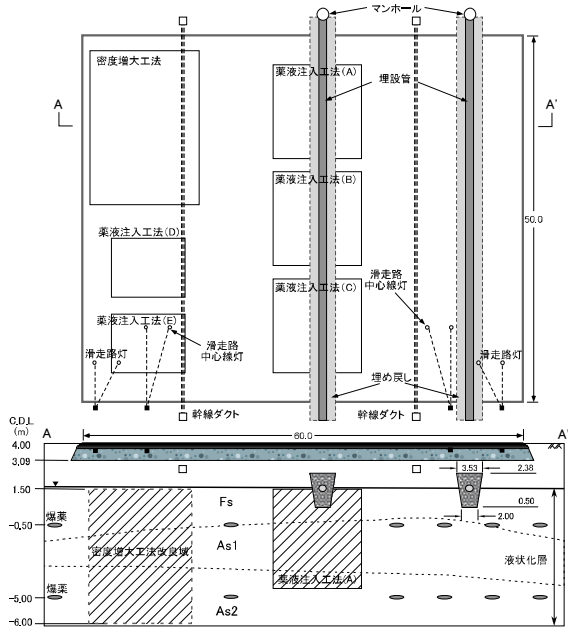


図-16 人工液状化実験滑走路部分平面および断面図

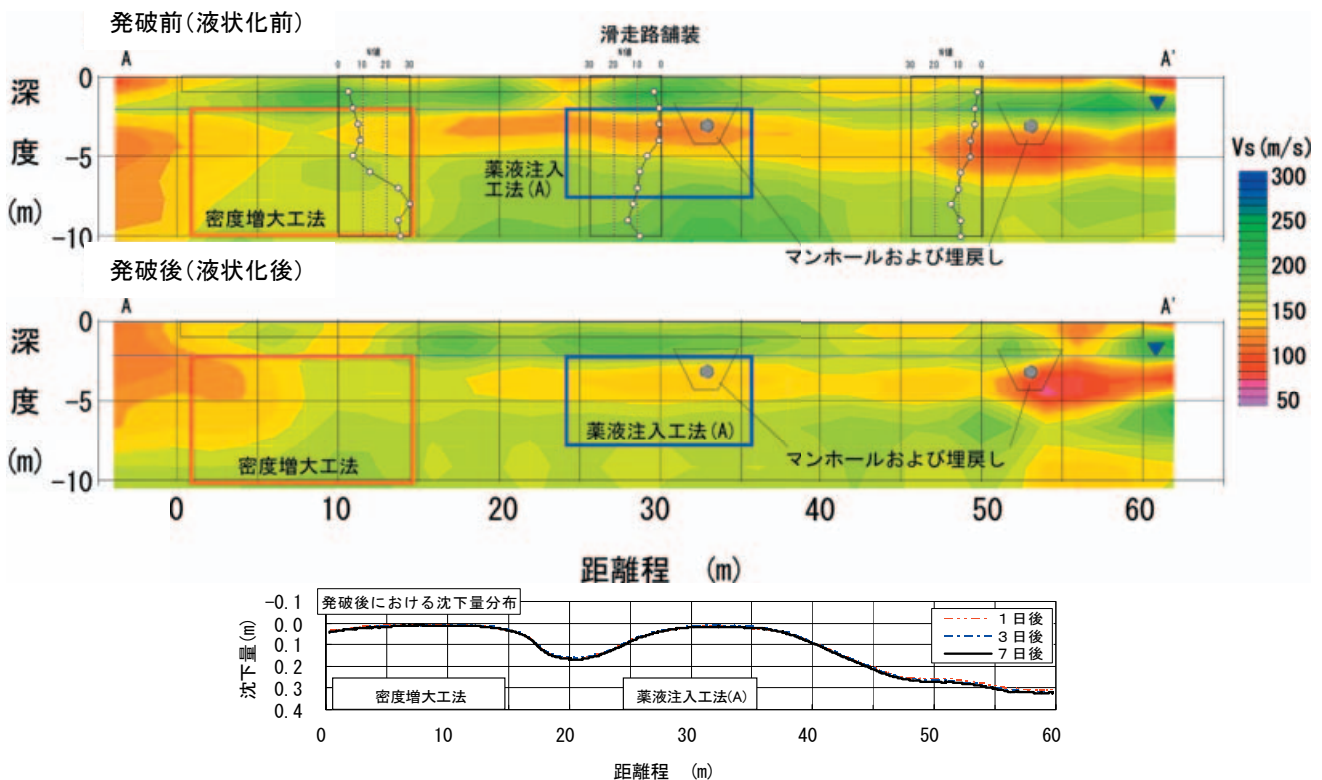


図-17 発破前後の表面波探査結果 (A-A'測線)

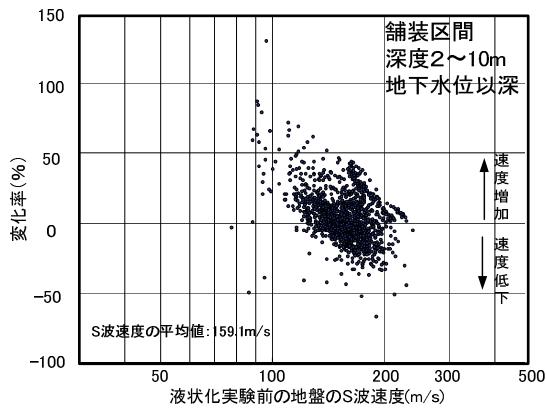


図-18 液状化実験前後の速度変化率

による液状化層の地盤の密実化が原因と推察され、この中に含まれる薬液注入工法範囲のS波速度の増加部分については、改良体両端における未改良地盤の沈下に伴うアスファルト舗装の引き込みによる影響の可能性も一因として考えられる。また、距離程52~60mの地下水面付近において、 $V_s=100\text{m/s}$ 程度の低S波速度範囲の拡大が見られるが、アスファルト舗装端部において発生した激しい噴砂の影響により、むしろ発破前よりも地盤が緩くなった可能性があるものと推察される。一方、密度増大工法範囲の距離程0m付近において、発破後にS波速度の低下が認められるが、周辺の液状化地盤からの過剰間隙水圧の伝搬による影響と思われる。ここで、制御発破による液状化により、地盤の密度変化をS波速度の変化から把握することを目的に、発破前後における同一測線でのS波速度変化率(%)について、液状化実験後のS波速度を $V_{sa}$ 、液状化実験前のS波速度を $V_{sb}$ とし、次に示す式で算定した。

$$S\text{波速度変化率} = \frac{(V_{sa} - V_{sb})}{V_{sb}} \times 100 \quad (6)$$

アスファルト舗装上で実施した測線における液状化実験前後の地下水以下GL-10mまでのS波速度変化率について図-18に示す。同図のプロットは、ばらつきが大きいものの、全体的な傾向として、初期のS波速度が速い箇所ではS波速度は低下傾向であるが、S波速度が遅い箇所では速度の増加が見られ、速度増加の分布範囲が低下の分布範囲に対し、やや上回っている様子が確認できる。

### 3.2 新潟空港

新潟空港では、埋立て部滑走路地盤の地盤改良域～非改良域の地盤情報と埋立て延伸工事に伴う旧護岸構造物の把握を目的に高密度表面波探査を実施した。探査結果については、既往ボーリングデータや付近で実施されたミニラムサウンディングの結果<sup>10)</sup>を併用しながら検討した。

現在の空港用地における調査位置平面図を図-19に示す。また、写真-4に航空写真による調査対象付近の変遷<sup>11)</sup>を示しているが、探査測線は、旧海岸線、護岸線および地盤改良域を対象として設定した。探査測線付近の既往ボーリング調査とミニラムによる地層想定断面図を図-20に示す。調査箇所付近の地盤構成は、最上部に埋立て盛土層(B)がGL-6~8m付近まで分布し、その下に液状化砂層である締まりの緩い砂丘砂層(Asd)がGL-13~16m付近まで分布している。また、その下に比較的締まりが密となる下部砂層(As)が分布している。なお、既往ボーリング調査結果であるNo.18-4を見ると、GL-8m付近で消波ブロックと思われるコンクリートを確認しており、写真-4に示す昭和48年当時の様子からもその存在を確認

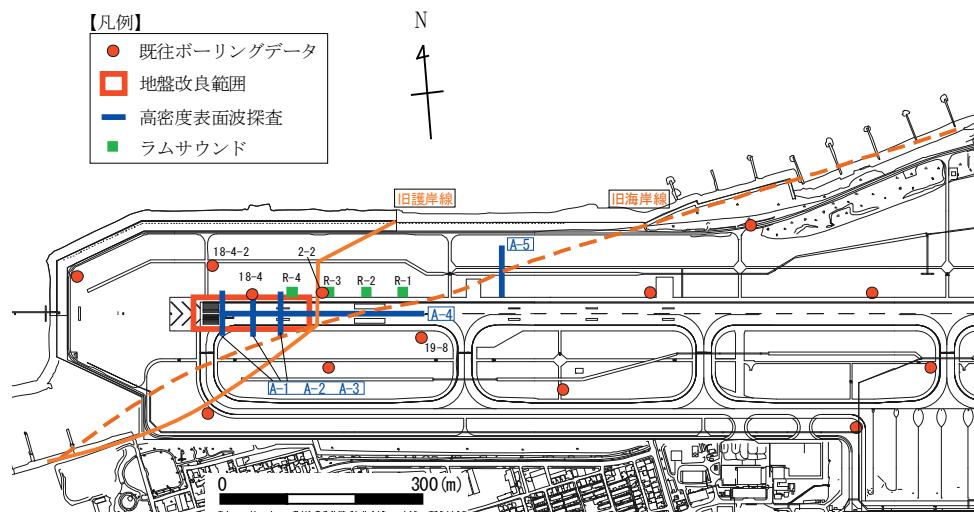


図-19 新潟空港調査平面図

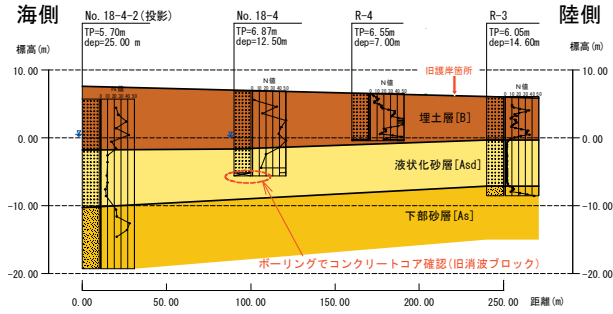
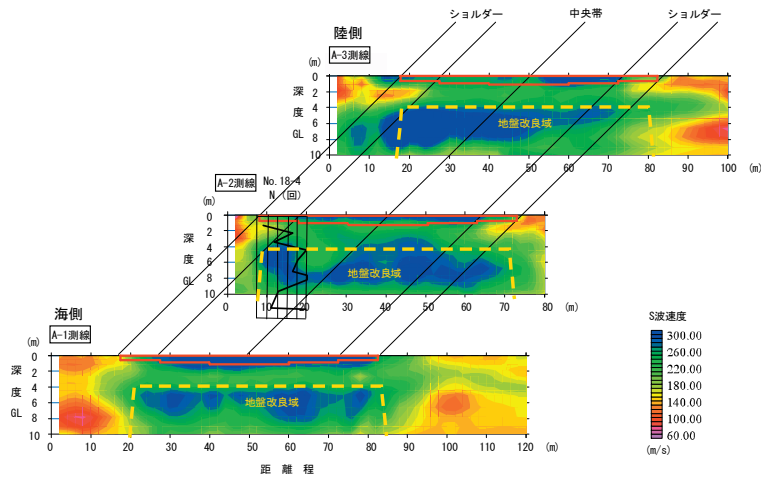
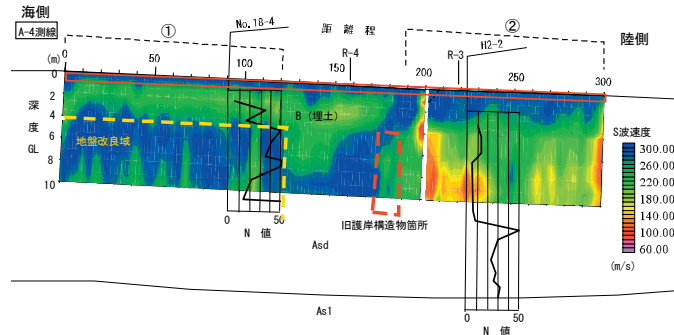


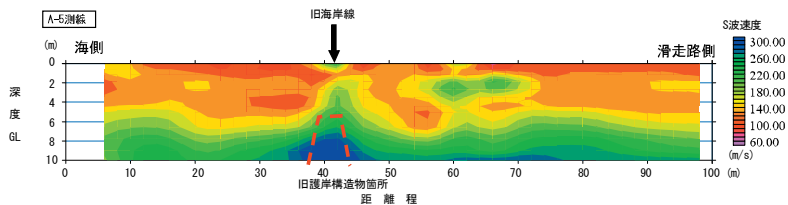
図-20 既往ボーリングおよびミニラムサウンディングに基づく地層想定断面



(a) A-1～A-3 測線



(b) A-4 測線



(c) A-5 測線

図-21 表面波探査結果

できる。

次に、表面波探査結果について述べる。図-21に滑走路横断測線であるA-1～3測線、縦断測線であるA-4測線、および旧護岸箇所を特定するために設定したA-5測線にお

ける二次元S波速度構造を示す。まず、滑走路中心線縦断方向に探査を実施したA-4測線のS波速度構造を見ると、図中①の範囲である起点である0mから距離程120m付近において、アスファルトに相当する表層1mのS波速度が

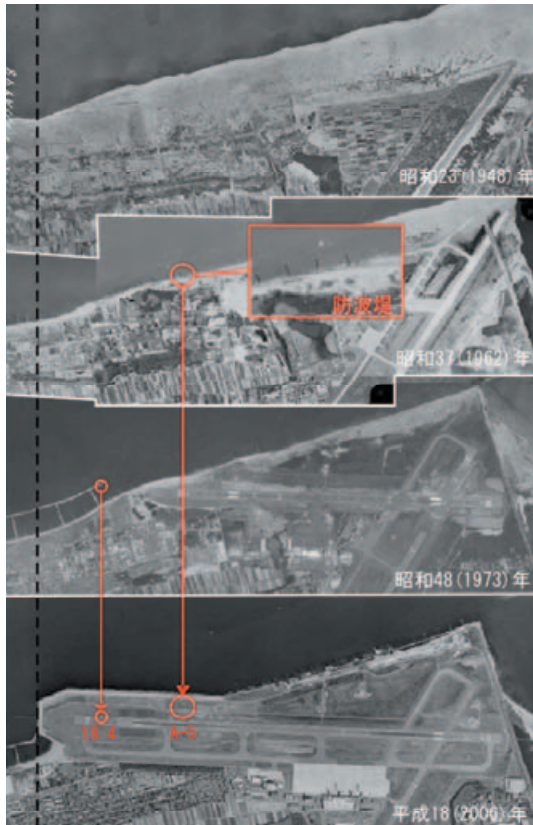


写真-4 新潟空港周辺状況の変遷 (国土交通省国土地理 国土変遷アーカイブ<sup>10)</sup>より引用)

300m/s相当、また、GL-4m以深においての同様なS波速度層が確認でき、これらのS波速度層の間は、200m/s前後のS波速度を示す。特に、GL-4m以深については、滑走路直下で地盤改良がされており、横断方向であるA-1～3測線においても、滑走路脇の未改良区域のS波速度が100～160m/sを示しているのに対し、滑走路直下では300m/s相当のS波速度を示し、地盤改良域の範囲を良く捉えている。

一方、図中②の範囲である距離程190m～300mでは、表層から深度2mまではS波速度300m/s相当の速度層が連続し、起点側よりも厚くなっている。また、それ以深ではS波速度は250m/s以下を示し、既往調査結果のN値の深度分布の傾向と整合が取れている。

上述の距離程0～120mおよび190～300mのエリア間の領域では、S波速度層が不連続になっている様子がわかる。ここで、図-19を見ると、この領域で埋立護岸を横断しており、A-4測線の両エリアで速度構造が変化する範囲は、延伸前の旧滑走路との施工境界に一致する。表層におけるS波速度層の層厚の変化は埋立てによる滑走路延伸に伴い、旧滑走路のオーバーレイの影響等が考えられ、施工状況を反映しているものと思われる。

次に、A-5測線は旧護岸箇所の特定をするために緑地帯

上に設定した測線であるが、この結果を見ると、距離程40m付近にS波速度分布の盛り上がりが見られる。この位置を写真-4に示す既往航空写真および既往のボーリングデータで確認すると、この位置におけるS波速度の盛り上がりは、波消ブロックによる可能性が大きいと推察される。

### 3.3 松山空港

高密度表面波探査、小規模微動アレイ探査および電気探査結果の調査位置平面図を図-22に示す。なお、図-22には滑走路延伸工事の時期と当時の海岸線も併記した。高密度表面波探査と電気探査については、滑走路縦断方向の同一測線上で実施し、工学的基盤を確認する目的で実施した小規模微動アレイは4箇所で行ったが、そのうち3箇所は滑走路上、残りの1箇所は既往ボーリング調査地点近傍において実施し、既知の層序と探査結果の比較をした。

図-23に探査測線付近における既存ボーリングデータを示す。層序については、現在の海岸線である海側から原地盤まで複雑な成層条件を示しているが、液状化層については概ね次のようにまとめられる。

- ・ 表層は、陸側から滑走路延伸工事の一期、二期、三期の埋土であるBs1、Bs2およびBgがそれぞれ連続する。Bs1とBs2は、N値が概ね5～27の礫混じり粗砂～シルト質細砂で構成されるが、最も海側であるBgは層厚約20mで厚く、N値が6～47のシルト混じり礫で構成される。
- ・ 埋土の下位に堆積する沖積砂質土層As1、As2およびAs3は、それぞれ、N値が1～13、5～25、2～31の細砂、シルト混じり中砂および細砂～シルト質細砂で構成される。

図-24に表面波および電気探査結果を示す。なお、これらの図は、水平方向に2m、一方、鉛直方向には、アスファルト舗装表面から0.7m、1.5m、2.5m、4m、5m、6m、7.3m、8.8m、10.4mおよび12.1mと深くなるほど、粗いメッシュで結果の分布をそれぞれ表示している。

表面波探査結果を見ると、三期埋立てである距離程0mから90m区間では、舗装下のGL-5m程度まで、S波速度が290m/s以上の速度を示し、液状化層に相当すると見られるS波速度が160m/s以下の速度層の分布が少ないことがわかる。隣接する距離程90mから520mまでの二期及び三期埋立ての範囲では、GL-5～10mの範囲においてS波速度が160m/s以下の低速度層が連続して分布することが確認できる。また、この区間内の距離程200mから450m区間のS波速度290m/s以上の表層は、周辺に比べ舗装下GL-2m程

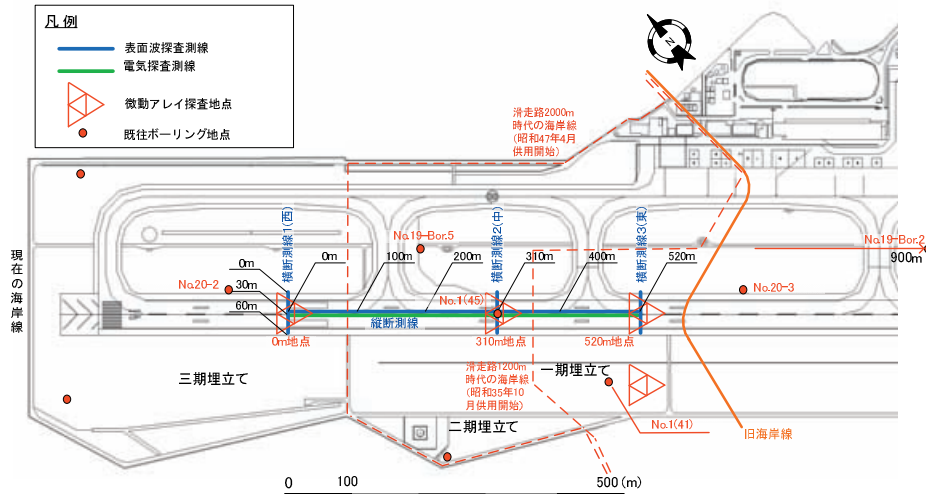


図-22 松山空港調査位置平面図

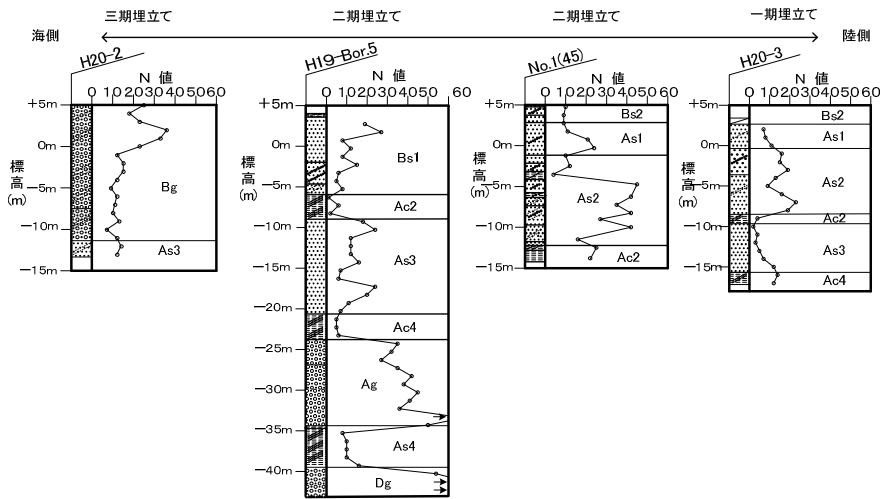


図-23 既存ボーリング調査結果

度までの薄層を示している。図中に併記したN値の深度分布と比較すると、N値に応じS波速度も変化している傾向を示し、既往調査結果とも概ね調和的な結果が得られている。

次に、表面波探査を実施した測線で試験的に実施した電気探査の結果について述べる。図-24に比抵抗分布を示す。本電気探査の範囲は、GL-1.8~10mを対象とし、先にも述べたとおり、深度が深くなるほどメッシュを粗くして表示している。同図より、GL-5m程度までが概ね67~220Ωmで連続し、部分的に220Ωm以上を示す箇所が確認できる。一方、GL-5m以深は、部分的に途切れてはいるものの67Ωm以下の低比抵抗分布が主体となっている。

比抵抗分布の結果の解釈としては、表-2に示す様に、比抵抗値が高く100Ωm以上を示す箇所は、砂や礫が卓越する地層であり、これより低比抵抗の箇所はシルトが多

く分布することとなる。例えば、GL-5m以深の低比抵抗の部位については、既存ボーリング結果の整理から、シルト分を含むAs2層やAc2層等が主体であるため、地盤材料に対し低い比抵抗値であるものの、概ね既存ボーリング結果と整合がとれているものと思われる。

図-25に小規模微動アレイ探査結果を示す。本探査は、高密度表面波探査の探査可能深度以深における地盤情報を把握するため、既往ボーリングデータと比較・検証を行った上、調査対象区間において3箇所実施した。探査結果より、表面波探査の適用深度（GL-10~15m程度）以深の弾性波速度構造を明瞭に捉え、探査地点周辺のN値の深度分布図と比較し、GL-10mからGL-14m付近とGL-20mからGL-25m付近の範囲に分布する低速度層の存在を確認できる。

最後に、滑走路で実施したGL-15mまでの表面波探査に



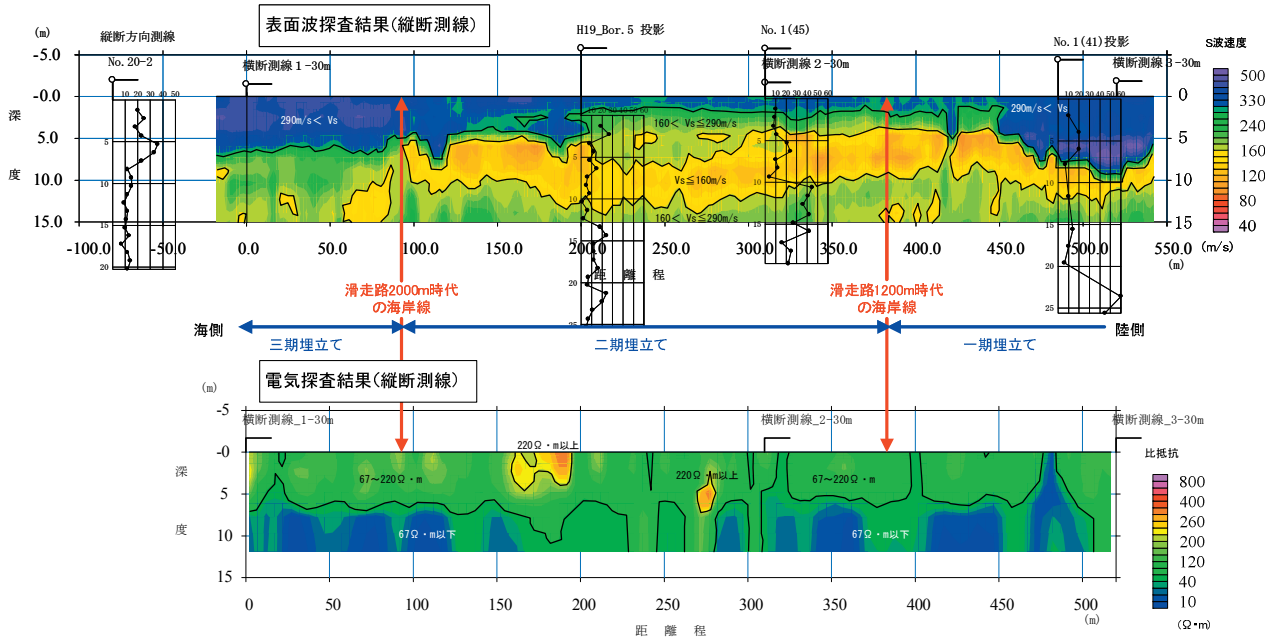


図-24 表面波探査および電気探査結果

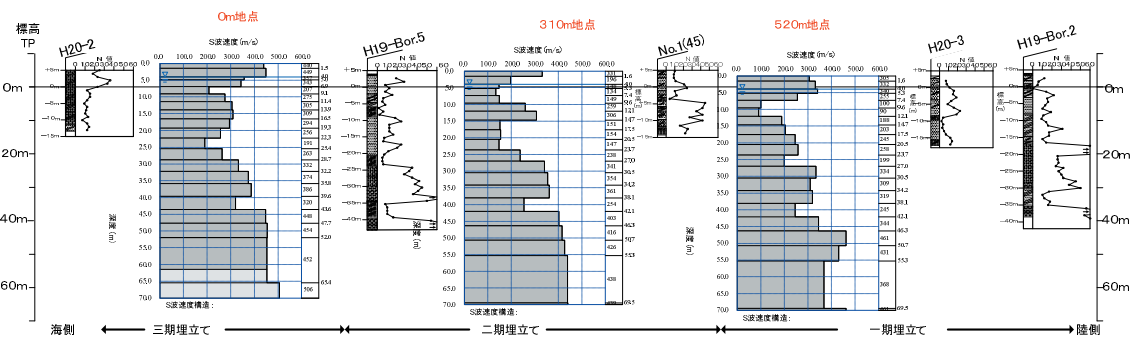


図-25 微動アレイ探査結果

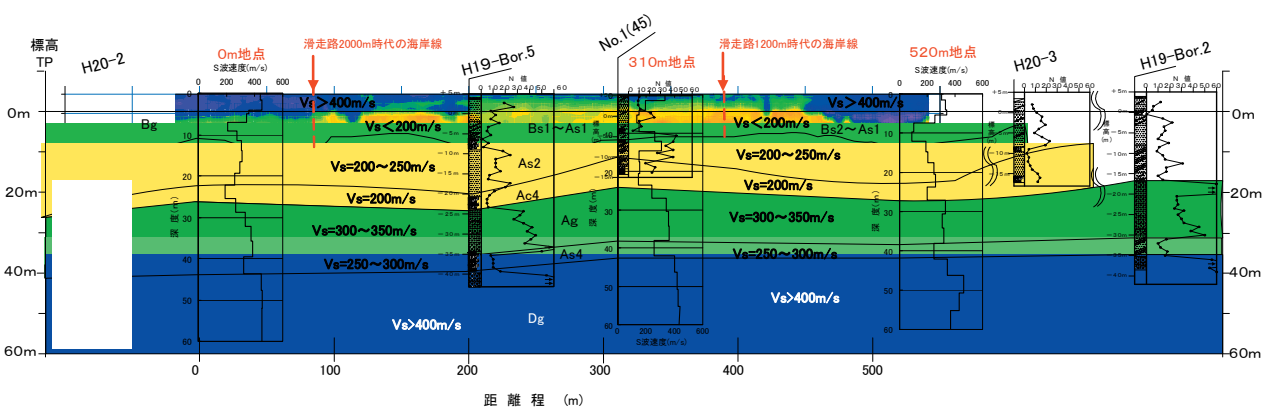


図-26 表面波および微動アレイ探査結果による地層想定断面図

加え、0m、310m、520m地点における表面波探査結果として小規模微動アレイ結果を内挿し、GL-60mまでのS波速度構造の推定を行った。図-26にS波速度の分布図を示す。表面波探査から得られるGL-15m程度以深に

におけるS波速度分布を見ると、表面波探査結果の様に連続的な情報は取得できないものの、滑走路縦断方向海側に向かい、同一のS波速度層が緩やかに傾斜している様子がわかる。

### 3.4 宮崎空港

高密度表面波探査測線、小規模微動アレイ探査位置平面図および既往調査による地層想定断面図を図-27に示す。なお、図-27には、旧海岸線も点線で併記した。高密度表面波探査については、滑走路縦断方向および既往ボーリング調査箇所を跨ぐ横断方向4測線で実施し、工学的基盤を確認する目的で実施した小規模微動アレイは、滑走路にあるいは滑走路脇の緑地帯において合計4箇所実施した。小規模微動アレイ4箇所のうち1箇所は既往ボーリング調査地点と同一地点であり、既知の層序と探査結

果の比較を行った。宮崎空港一帯は、宮崎層群 (Tm) の泥岩および砂岩泥岩互層を基盤岩とし、その上位を沖積層が覆っている。沖積層は、上部から盛土(B), 砂質土層および粘性土層As1層, Ac1層, As2層, Ac3層, Ag3層およびAs3層による成層条件となっている。Tm層に関しては、滑走路縦断方向に、海岸部へ向けてなだらかに傾斜している。既往調査によると、暗灰色を呈した泥岩による固結土状のコアが採取され、コアの岩組織は明瞭であるが、手で砕くことが可能なほどに軟質であるため、岩質的には軟岩に相当すると考えられる。

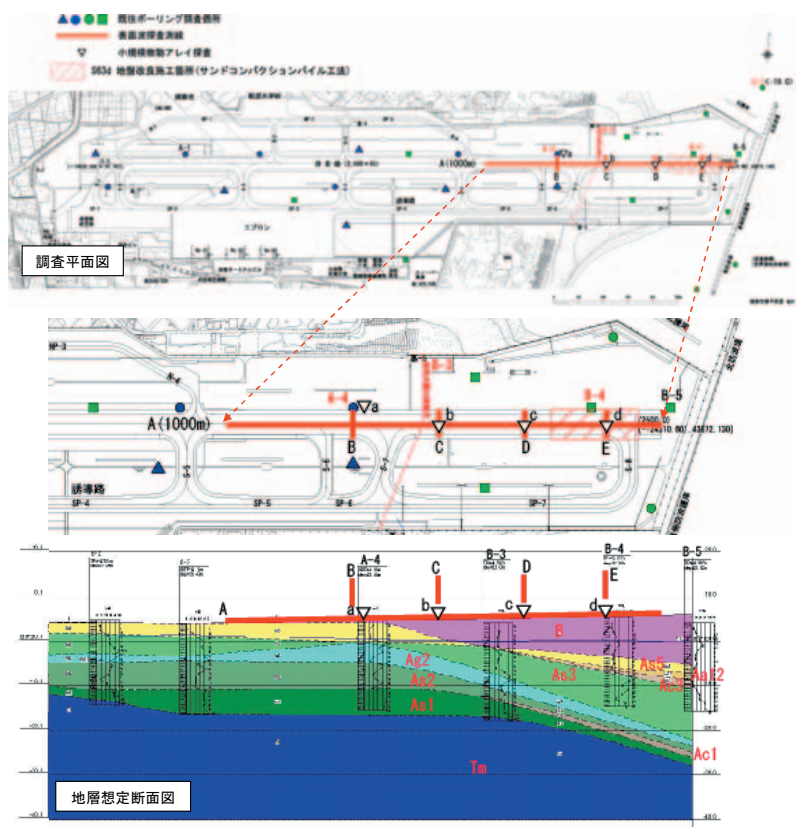


図-27 既存調査結果による断面図

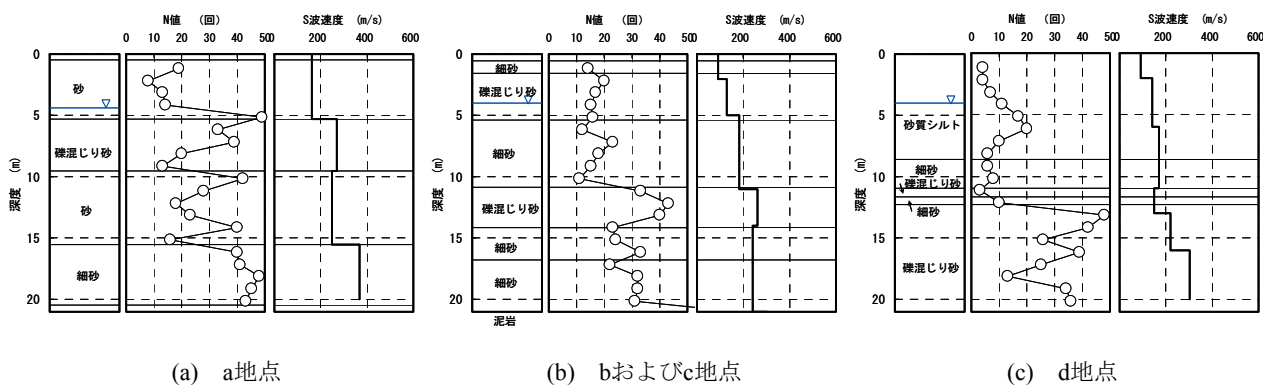


図-28 既往調査結果 (N値およびS波速度結果)

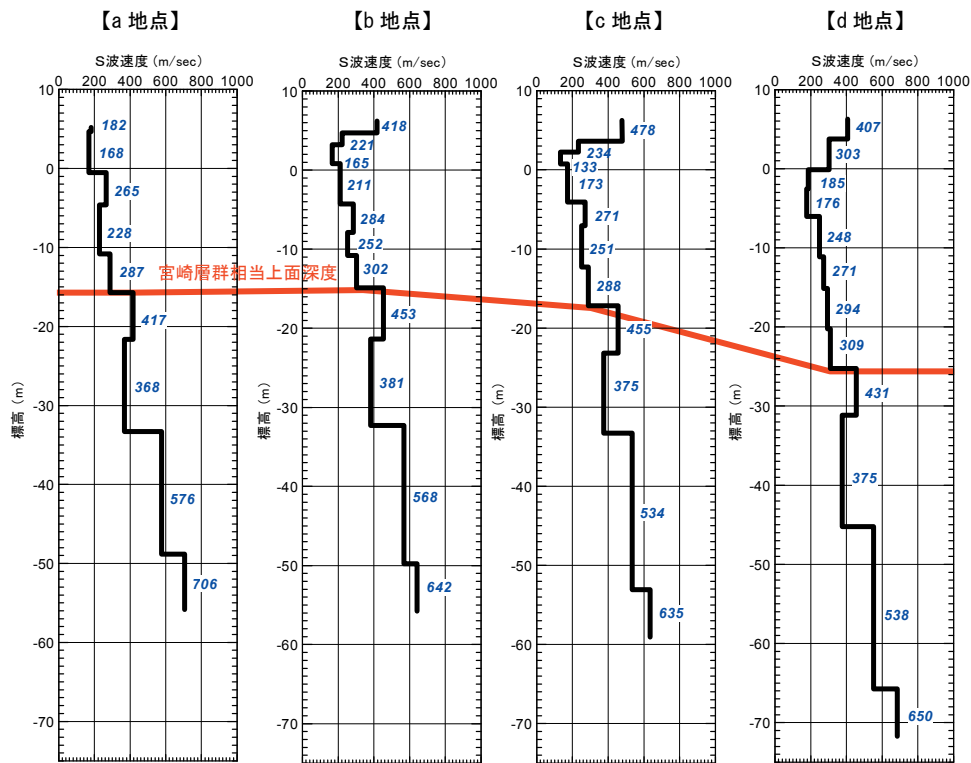


図-29 小規模微動アレイ結果

図-28に示す既存ボーリングデータを基に、今回の探査では宮崎層群（新第三系）までの堆積層の構造推定が想定されるため、この宮崎層群（新第三系）に相当するS波速度層を基底とするモデルを作成した。なお、工学的基盤相当までの層序が得られているボーリング箇所は、B-3地点のみであるため、A-4およびB-4についてはB-3地点を参考に基底までのモデルを作成した。各地点における微動アレイ探査の結果を図-29に示す。図-28に示すS波速度の深度分布図と対比すると、得られたS波速度構造は、比較的一致しているものと考えられる。

次に、表面波探査で得られた解析結果を図-30に示す。主測線においては、起点から900m付近まで、地表面付近にS波速度300m/s以上の高い速度が認められるが、900m付近から終点にかけては地表面付近に高いS波速度が認められなくなる。これは滑走路の路盤の性状が異なることによると思われる。標高-10m以深は、S波速度300m/s以上の高い速度層が分布している。この速度層は起点から700m付近まではほぼ平坦であるが、700m付近から終点に向かって深くなるから傾向が認められる。この深度-10m以深の速度層分布は基盤分布を反映した形状と思われる。地表付近とTP-10m以深に存在するS波速度300m/s以上の速度層の間には280m/s以下の速度層が起点から終点まで連続して存在している。300m付近から終点に向かい速

度が低下する傾向にあり、特に780m付近から終点にかけて200m/s以下の速度層が厚く認められる。これは、写真-5に示す空港の変遷における埋立て部分に相当する。図-31の総合結果より本調査結果について考察する。既往調査によれば、本調査範囲は海岸に向けて液状化対象埋立層Bが厚くなると考えられる。表面波探査、微動アレイはこの地盤構造をとらえており、本調査結果の有効性が確認された。特に旧海岸線付近を堺に海側にS波速度が低くなる傾向にあり、施工履歴の違いによる速度構造をとらえている。TP-10m以深は $V_s \geq 300\text{m/s}$ となり、海側に向け深くなる傾向を示す。この傾向は、表面波速度、微動アレイいずれも、同様であり両探査法の整合性が確認された。GL-5m以浅のS波速度は表面波探査の方がやや大きくなる傾向が見られる。これは、速度の速い舗装の影響を受けたものと考えられる。d地点付近は、空港の延伸工事による埋立て地盤であるが、昭和63年の日向灘沖地震で液状化した後に、TP-1.4m～-6.6mの範囲でサンドコンパクションパイルが施工されている記録があったが、本調査の結果、SCP改良域に明確な速度差は確認されなかった。既往調査によれば、a地点より陸側は、舗装を除き液状化対象層と考えられる層が2m程度あるものと考えられるが、表面波探査の結果、あまり明確には確認されなかった。

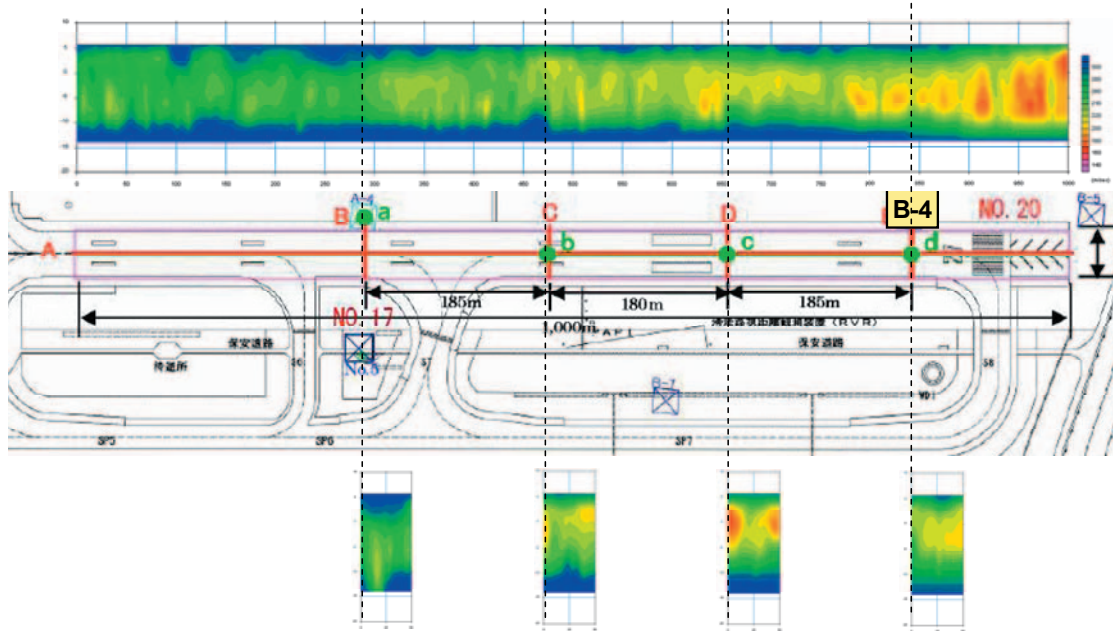


図-30 表面波探査解析結果

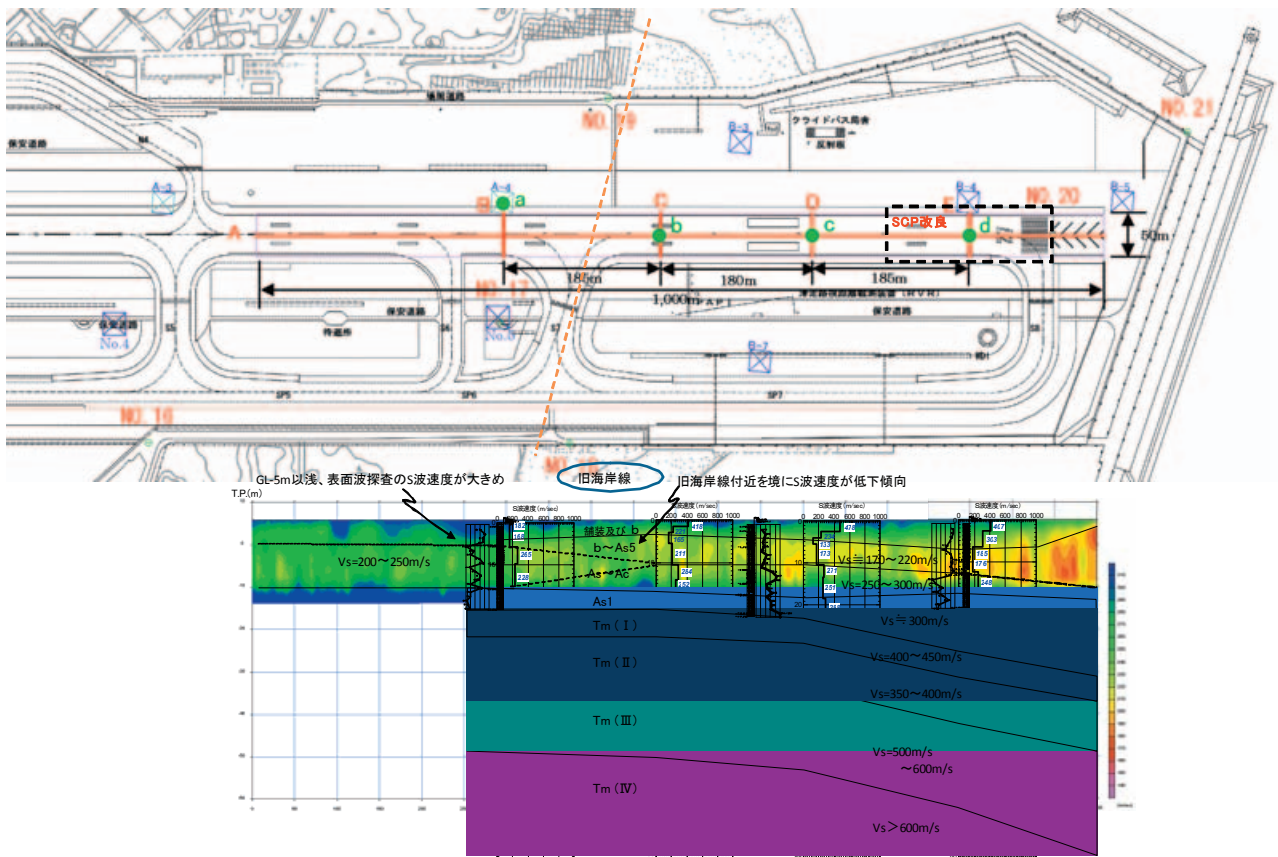


図-31 表面波探査と小規模微動アレイによる地層想定断面図

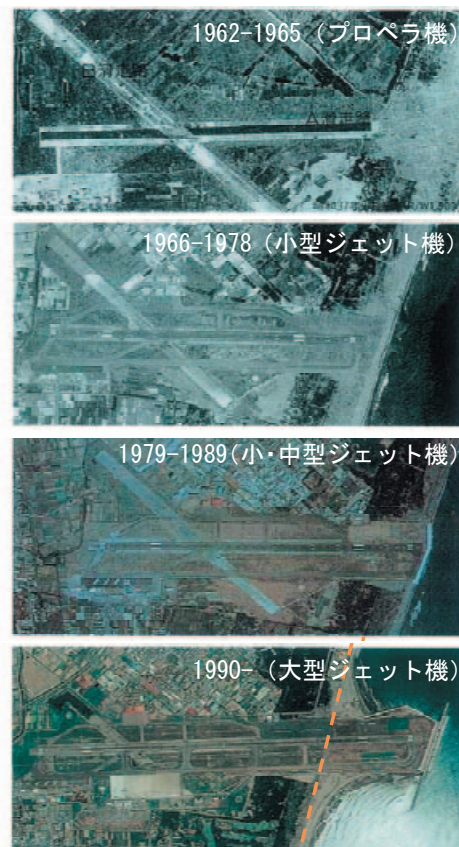


写真-5 宮崎空港の変遷 (参考文献12に修正加筆)

### 3.5 東京国際空港

東京国際空港では、所々、液状化対策が施工されている誘導路上から、表面波探査および電気探査を実施し、液状化層および地盤改良範囲確認の把握を試みた。なお、実際に施工された液状化対策工は密度増大工法の一つである静的圧入締固め工法である。また、小規模微動アレイによる静的圧入締固め工法による地盤改良深度の確認および工学的基盤の確認を一か所で行った。探査箇所平面図を図-32に示し、探査範囲の地層想定断面図を図-33に示す。既往ボーリング調査は、誘導路上25mピッチで実施しており、事前に比較的详细な地層断面図が得られている。なお、表面波および電気探査結果の表示は、これらの図は、表面波探査では、水平方向に2m、鉛直方向には、アスファルト舗装表面から0.5m、1.2m、1.9m、2.6m、3.5m、4.5m、5.5m、6.6m、7.8m、9.1mおよび10.4m、一方、電気探査では、水平方向に2.5m、鉛直方向には、アスファルト舗装表面から0.6m、1.6m、3.2m、5.8m、および10mと深くなるほど、粗いメッシュで結果の分布をそれぞれ表示している。

図-34に探査測線上における代表地点の既存ボーリングデータを示す。図-33と併せ既存ボーリング調査結果から得られた層序と地層についてまとめる。上位より埋立層（埋土層、浚渫粘性土層、浚渫砂質土層）、有楽町層、七号地層が確認されている。海底上に浚渫土や建設発生

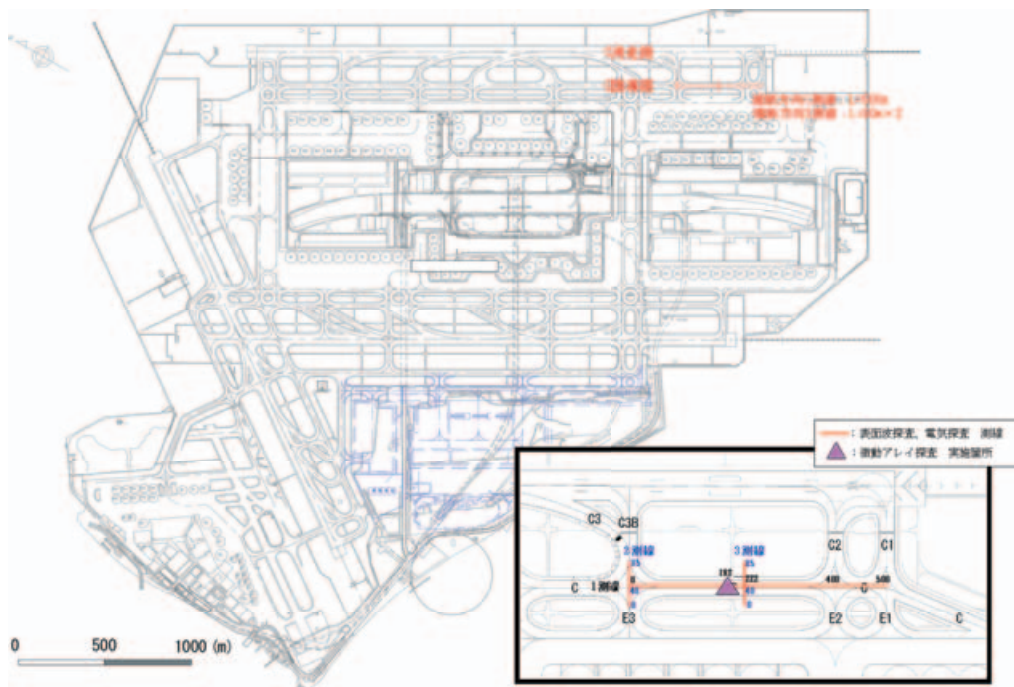


図-32 探査箇所平面置図

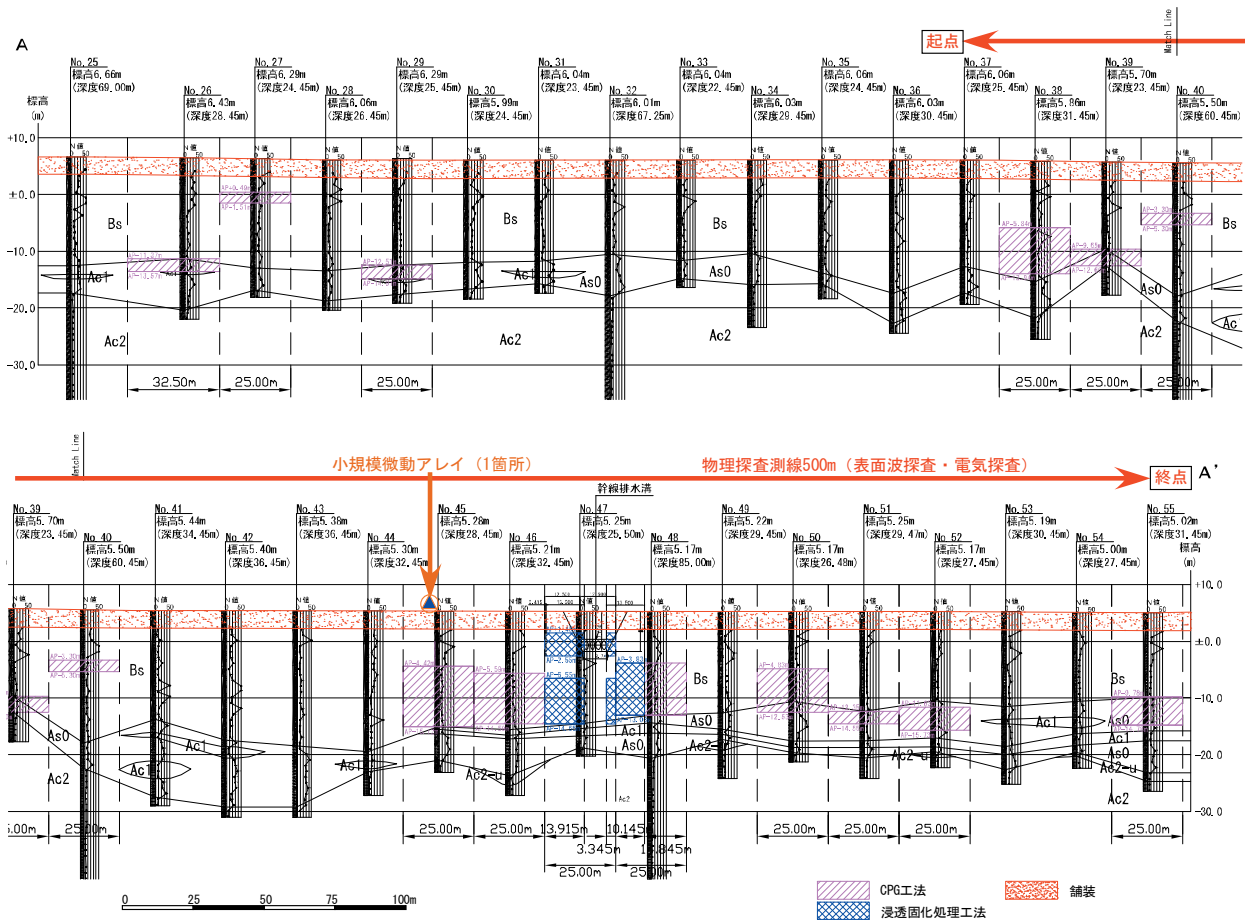


図-33 探査測線における地層想定断面図

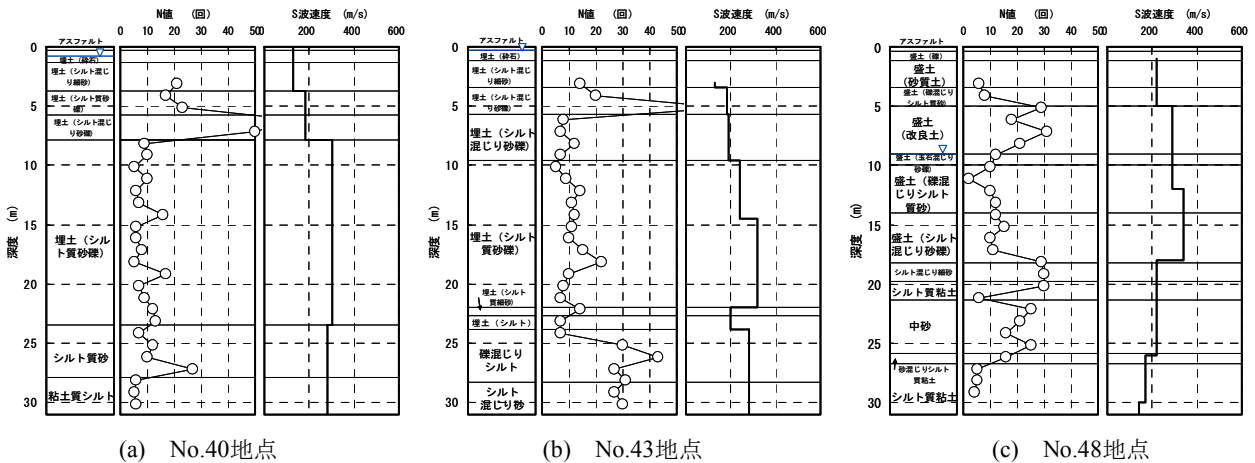


図-34 代表地点の既存ボーリング調査結果

土で埋立てられた最も新しい地層である埋立層は、層相と層序の違いにより、埋土層 (Bs)、浚渫砂質土層 (As0)、浚渫粘性土層 (Ac1) の3層に分けられる。探査で対象とするBs層およびAs0層について次にまとめる。Bs層は、地表面よりアスファルト、碎石およびシルト混じり細砂からなる舗装体でありその直下には、シルト混じり砂礫、

シルト質砂礫を主体とし、礫はコンクリート片、改良土片、アスファルト片、レンガ片、角礫、亜角礫、円礫および亜円礫で構成される。全体に礫の混入量は非常に多いのが特徴である。層厚は15.4m~24.8m程度であり、N値は全体で1~50以上と幅広く分布する。次に、浚渫砂質土層 (As0) であるが、シルト混じり砂、シルト質砂お

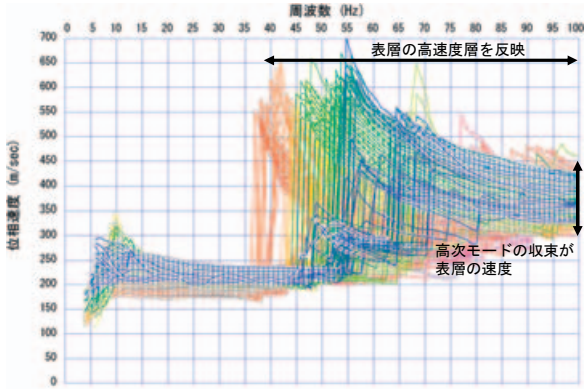


図-35 分散曲線一覧（縦断方向）

および礫混じり砂を主体とする浚渫土である。砂は細砂を主体とするが、粒径は不均一である。層厚は3.0m～13.8m程度であり、No.41～No.43間で最も厚くなる。N値は6～43と幅広い分布を示す。

図-35に縦断方向の表面波探査から得られた分散曲線を示す。既存のボーリング調査によると、表層の0.3m付近までアスファルト、GL-1mまで路盤、およびGL-3～4mまでが路床という舗装構造を有している。一方、PS検層

結果から、路床付近の $V_s$ は220m/s以下とやや低速度を示しているため、図-35に見られる高次モードの要因はGL-1m程度までのアスファルトおよび路盤層の高速度層にあると考えられる。高次モードが出現する周波数や、それが収束する速度にばらつきが認められることから、表層はかなり不均質であることが伺える。

図-36に表面波探査結果を示す。図中に示した探査結果における深部の色の薄い箇所は、解析結果として信頼度の低い部分であり、本探査ではGL-10m程度までのS波速度構造が把握できているものと考えられる。また、得られた $V_s$ は、表層の高速度層を除き、200～300m/sを示す領域が主体であり、部分的に300m/sを超える箇所が存在している。縦断測線で $V_s$ が300m/s以上を示す箇所は、CPG改良時の設計深度よりも2～3m程度浅く出現しているものの、概ね改良範囲と一致している。ただし、全ての改良範囲が速度の速い区間として表現されているわけではなく、その深度や改良効果とも関係していると考えられる。なお、10m程度までの地盤状況は、深度3m付近までが舗装体、それ以深の埋土は建築廃材などが数多く混入し、かなり雑多な状態が確認され、一部には、過去に地

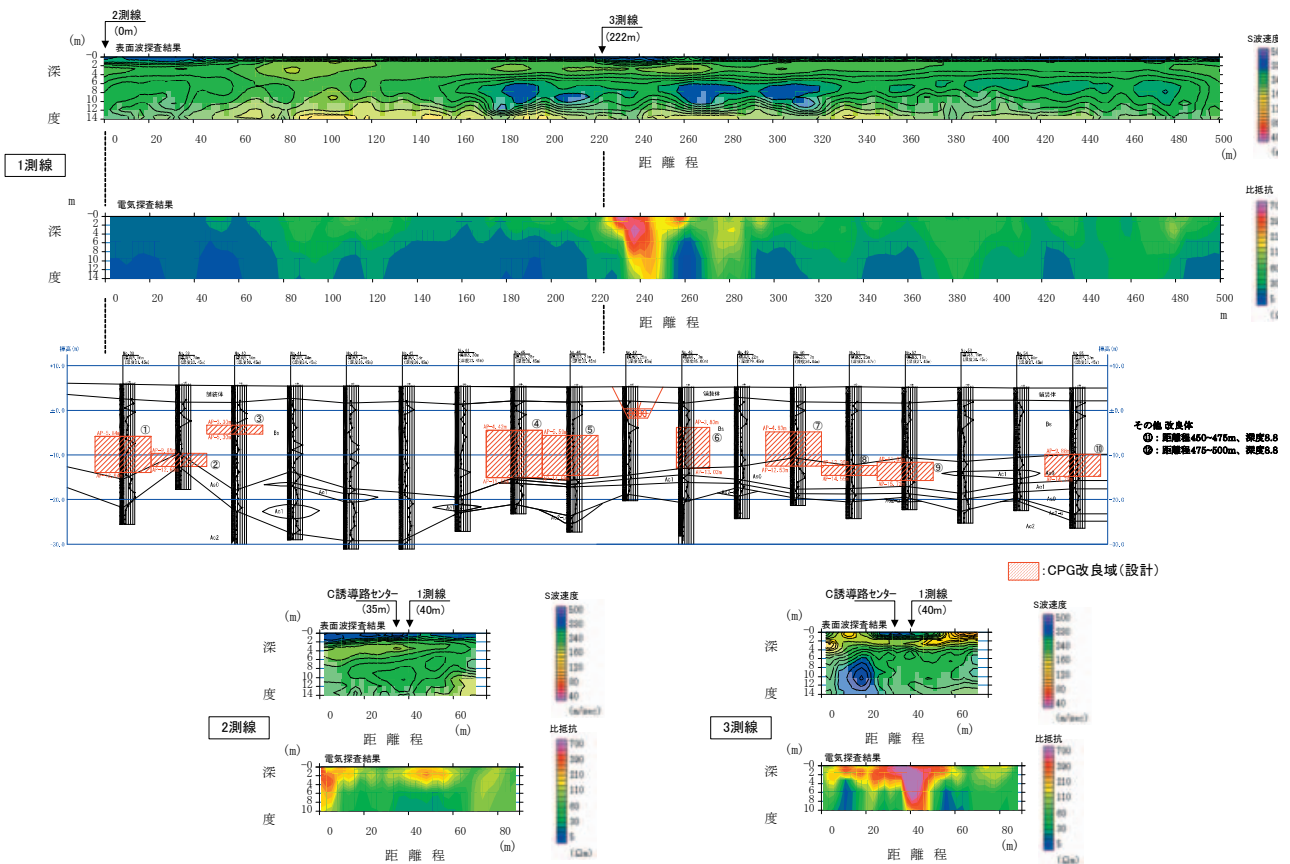


図-36 表面波探査および電気探査結果

盤改良がなされたとと思われる箇所も存在している。表面波探査結果から、このような過去の改良体に300m/s以上を示す箇所は認められないが、距離程260m付近から終点側に向けて深度5mに見られる280~300m/sのやや速度の速い領域は、過去に施工された改良体を反映している可能性もある、既存ボーリングの結果から、この区間には古い改良体と思われるものが確認されており、表面波探査で高速度域として確認した地盤改良体が2m程度浅く現れたのは、この旧改良体の影響を受けているものと考えられる。

次に、図-36に示す電気探査結果を見ると、電気探査実施時の通電値は約2mAと小さかったため、土質との対比で見ると、全体的に非抵抗値が低い傾向にあった。縦断測線は距離程210m付近を境に傾向が変わり、距離程の前半部分は20Ω・m以下の領域が大部分を占めるのに対し、後半部分は30~100Ω・mを主体とし20Ω・m以下の領域が部分的に存在している様子がわかる。また、距離程240m付近に見られる高比抵抗域は排水溝の位置と一致している。

縦断測線前半のうち、距離程80~120m付近はその周囲に比べ比抵抗が高く30~70Ωmを示しているが、この区間はS波速度も180~200m/s程度で周囲より速度が遅い箇所と概ね一致する。低比抵抗部分はシルトなど細粒分の含有率が比較的多いか、図-34にも一部を示しているが、過去に行われた地盤改良を反映している可能性があることが考えられる。

一方、横断測線である2, 3測線の結果を見ると、縦断測線に比べ高比抵抗を示しており、特に2測線では得られた比抵抗値が1測線の結果と交点付近で一致しなかった。この要因として、1測線と2, 3測線で降雨等の測定条件が異なっていたことが挙げられる。縦断測線における測定開始の2時間前には集中的な降雨が発生しており、このため表層の極めて高比抵抗と考えられる領域が一次的に低比抵抗側にシフトする等の影響があったものと推察される。一方、降雨の影響を受けていない2, 3測線では十分な測定電位を得るだけの電流を地盤に通電しきれず、その結果、比抵抗の絶対値を正確に捉えていない可能性も考えられる。

図-37に小規模微動アレイ観測から得られたS波速度構造を示す。本測定は、最大アレイ長を40mとし、アレイ中心は改良体上である縦断方向192m地点で実施し、改良範囲の深度分布を把握することを目的に実施した。解析に当たり、微動アレイ探査で得られた測定データに、近傍の表面波探査で得られた測定データを接続し、解析に使用する分散曲線とした。これは、微動アレイ探査の測定

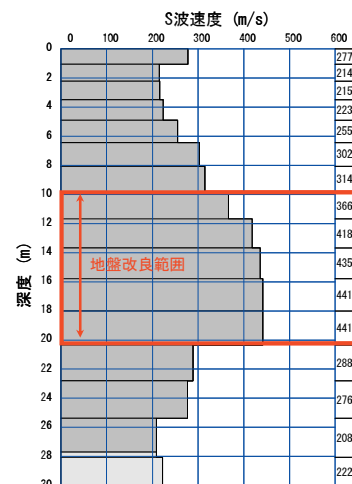


図-37 小規模微動アレイ探査結果

システムでは得にくい高周波部分のデータを取り入れることによって、解析の精度を高めるため行った処理である。なお、解析の対象は、表面波探査同様50Hz以下とした。得られたS波速度構造からは、表面波探査だけでは把握しきれなかった改良体の全域とその下の低速度域（未改良域）を捉えていることがわかる。

図-38に図-36に示す各地盤改良範囲において、既往地盤調査結果に表面波探査および電気探査結果を併記し示す。また図-38に示す結果のとりまとめを表-3に示し、地盤改良範囲と各調査結果を比較し以下にまとめる。

- $V_s$ が300m/s以上を示す箇所は、地盤改良の設計深度上端より2~3m程度浅く出ているものの、概ね地盤改良範囲と一致している。
- 全ての改良範囲がS波速度の速い区間として、表面波探査結果が得られなかった。
- S波速度の速い領域として認められた改良体に共通する事項として、改良体上端が約10mより浅いこと、および改良によるN値の増加が平均で概ね20以上であることの2つの要因が挙げられる。比較的浅部に位置する改良体③付近のS波速度が周囲と差が見られないのは、層厚が2mとやや薄いことも要因の1つになっているとも考えられる。
- 本調査では1測線前半（距離程0~220m付近）が全体的に低比抵抗と表現されているため、同じく低比抵抗の改良体は把握されていない。
- 距離程220m以降では、改良範囲の多くが低比抵抗域と一致する。表面波探査と同じく、改良工事の設計深度より浅くから認められる傾向にある。
- 地盤改良範囲のうち、距離程450~475m区間は改良率5%、475~500mは改良率8%で施工がなされているが、



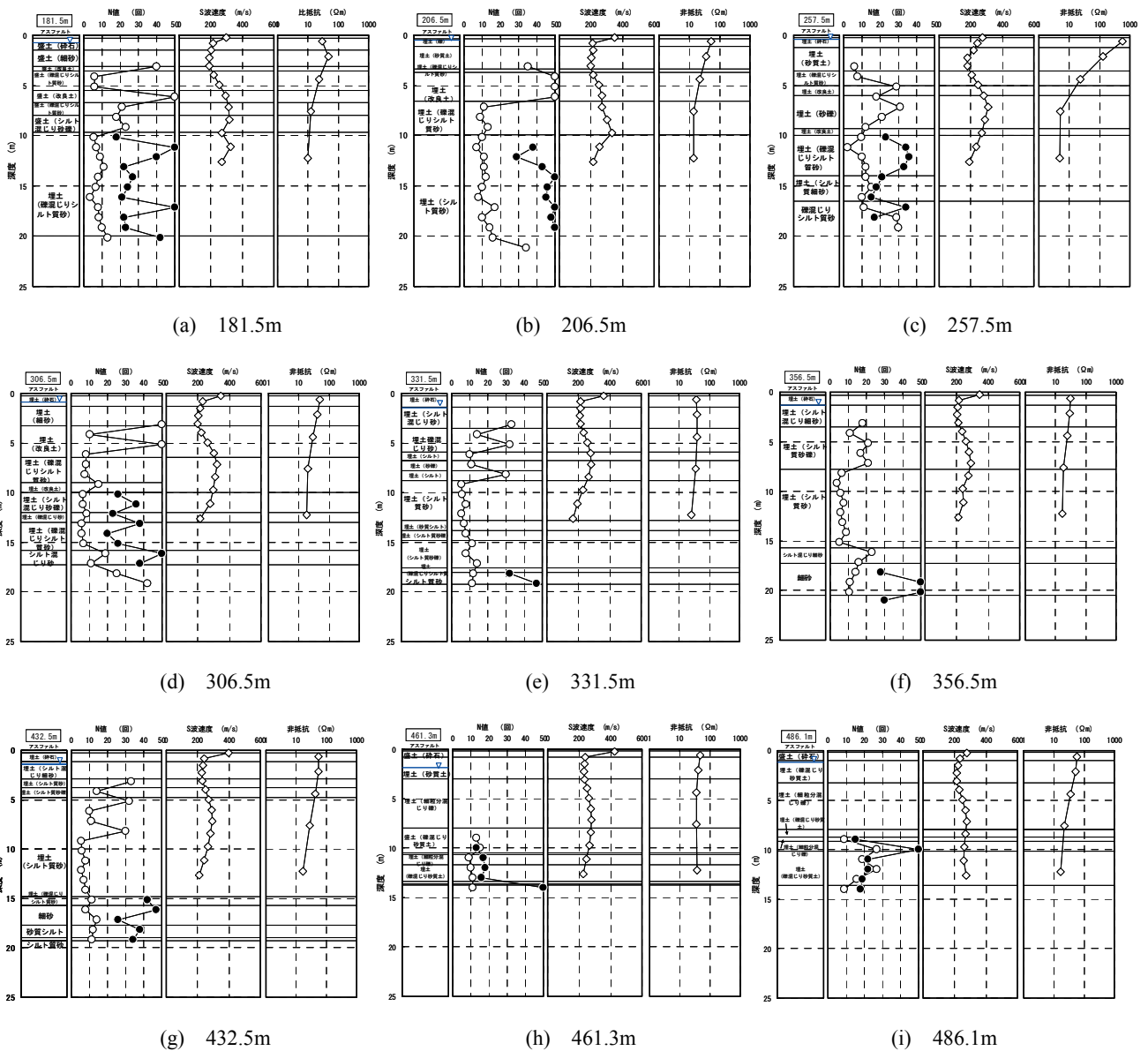


図-38 地盤改良代表地点における改良効果確認調査結果

表-3 地盤改良範囲における探査結果のとりまとめ

改良体 No	1測線 距離程(m)		上端深度 (m)	下端深度 (m)	対象Bor	改良後N値の増加量		探査結果		備考
	起点	終点				変動幅	平均	S波速度	比抵抗値	
①	-6	19	11.7	19.8	No.38	-				
②	19	44	15.4	18.3	No.39	-				
③	44	69	8.9	10.9	No.40	-				
④	169	194	9.7	20.4	No.45	11~43	22	>250m/s		微動アレイ 実施
⑤	194	219	10.8	19.8	No.46	18~42	34	>250m/s		
⑥	254	269	9.0	18.2	No.48	≦0~32	17	>250m/s	<20 Ωm	
⑦	294	319	10.0	17.8	No.50	14~32	23	>250m/s	<20 Ωm	
⑧	319	344	17.6	19.8	No.51	20~36	28			
⑨	344	369	16.8	20.9	No.52	12~39	27			
⑩	420	445	14.9	19.8	No.55	12~39	26		<20 Ωm	
⑪	450	475	8.8	14.8	No.5	≦0~23	8			改良率5%
⑫	475	500	8.8	14.8	No.7	≦0~39	10		<20 Ωm	改良率8%

地盤改良による顕著なN値の増加は認められていない。しかし、電気探査の結果から、距離程480~500m区間・深度8m以深で20Ω・m以下の低比抵抗領域が認

められるため、改良率の差異が比抵抗分布の違いの要因となっていることも考えられる。

以上のことから、本調査では地盤改良の効果がN値の増

加として顕著に現れているものについては、探査深度10m付近までなら表面波探査で把握することが出来たと言える。

#### 4. 被災予測への適用

今回、5件の滑走路地盤における物理探査事例を示し、主に表面波探査によるボーリング地点間の空間補間、地中に埋設されている構造物の確認および地盤改良範囲の評価を行った。しかし、既往の研究において式(1)および(2)に示すような各土質毎のS波速度とN値の関係は提案されているものの、各現場毎の整合性やより精度の良い探査結果を得るためには、予め概略の層序がわかっている条件下で用いる必要があるものと考えられる。新潟空港のように、成層条件が比較的単純な場合には、表面波探査のみでのボーリング調査地点間の空間補間が可能であるが、松山空港や東京国際空港のように、複雑な施工履歴により、成層条件が複雑であると考えられる場合には、電気探査等の別途手法により土質も確認しておく必

要性も生じてくるものと推察される。そこで、以下に松山空港および東京国際空港における探査事例に基づき、表面波探査と電気探査結果の併用による簡易液状化抵抗評価を行った。

##### 4.1 松山空港における簡易液状化抵抗評価

図-39に図-23で示した代表地点No.1(45)における既存ボーリング調査結果および近傍の地点における探査結果を一次元で示す。同図では、S波速度の拘束圧依存性を考慮し、式(7)に基づき基準化S波速度<sup>13)</sup>求め図中に示した。

$$V_{s1} = V_s (P_a / \sigma_v')^{0.25} \quad (7)$$

ここに、 $P_a$ は基準拘束圧(98kPa)、 $\sigma_v'$ は有効土被り圧を示す。As1とAs2の上部が液状化層に相当するものとし、地下水面下における表面波探査および電気探査結果についてのデータについて検討した。

図-40に基準化S波速度と土質との対応を示す。液状化

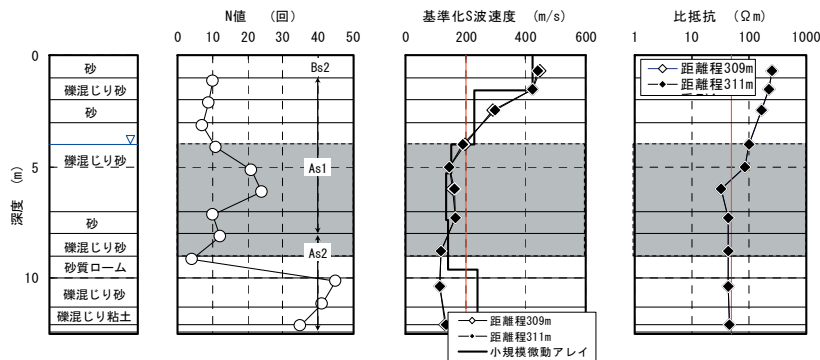


図-39 S波速度と比抵抗値の閾値の設定

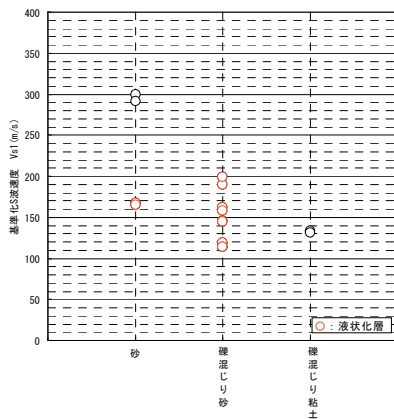


図-40 ボーリング結果に基づく土質毎のS波速度の分布

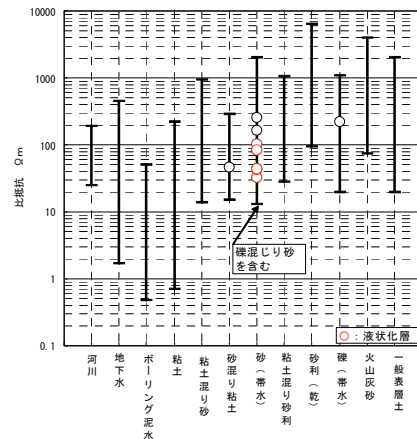


図-41 既往資料に基づく比抵抗値と探査結果の比較

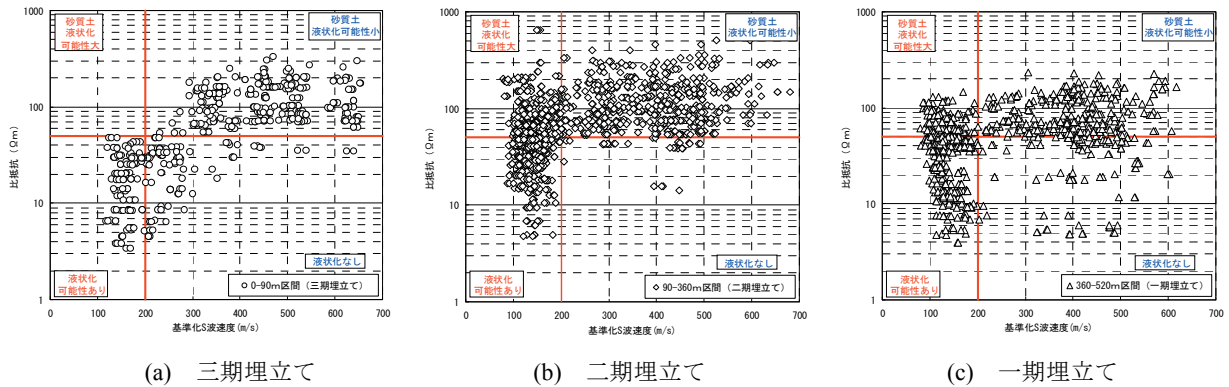


図-42 S波速度と比抵抗値の関係

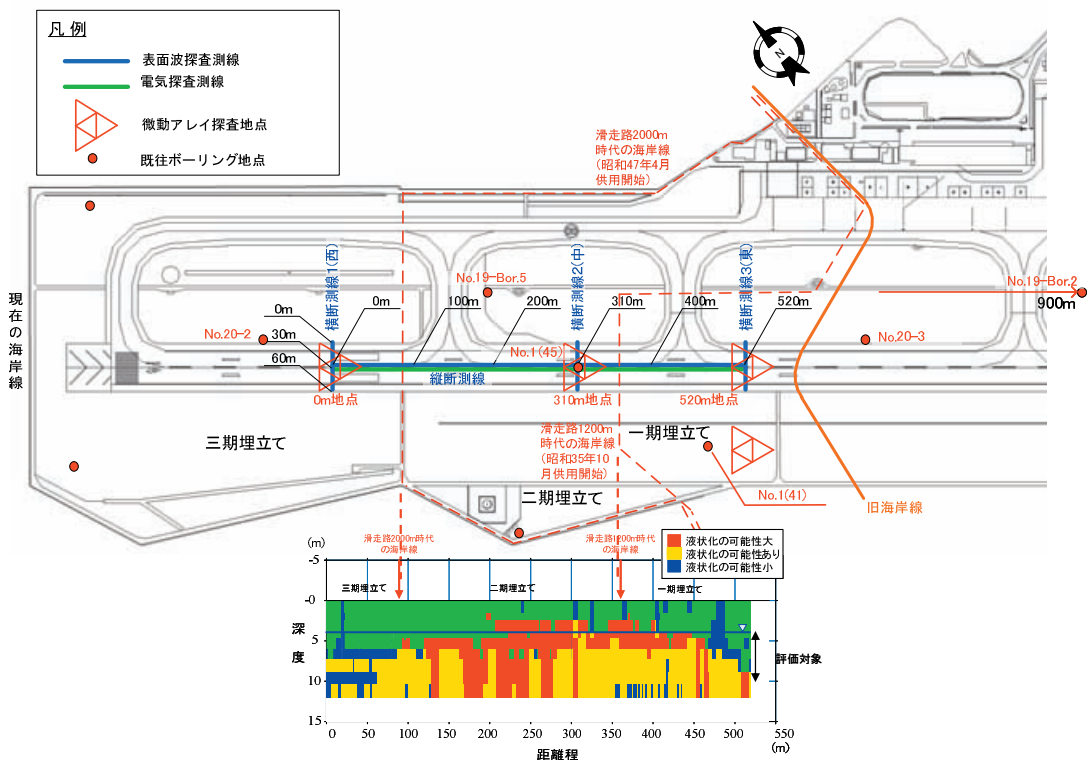


図-43 簡易液状化危険度評価

層に相当する砂および礫混じり砂に関し、 $V_{s1}$ は200m/s以下を示していることから、液状化・非液状化の閾値を $V_{s1}=200\text{m/s}$ と設定した。

図-41は参考文献14)に示されている地質・土質と比抵抗の関係について、土質に拘わる項目を抽出し比抵抗値の分布を示したものであり、図-39に示す該当する電気探査結果を併記したものである。飽和している地層では、表-2に示す通り、一般に該当する土質の粒径が小さい程比抵抗が低く、粒径が大きい程比抵抗が高くなる傾向にある。液状化層に該当する砂を見ると、砂および礫混じり砂と広範囲の土質分のプロットが含まれるため、プロ

ットにばらつきが確認できるが、非液状化層との閾値は平均的に50Ωmとした。

図-24に示した表面波探査および電気探査結果の比較から得られたS波速度と比抵抗値の関係を図-42に示す。図-42に示されているデータプロットは、滑走路拡張に伴う一～三期埋立てによる区分ごとに整理されており、いずれも地下水以下のデータである。探査区間の全体的な傾向として、各埋立て範囲毎では次のようにまとめられる。

- (a)に示す三期埋立て範囲では、S波速度と比抵抗値は比較的単一な関係にあるが、S波速度が高めで粘性土

寄りにプロットが分布し、液状化の可能性が比較的低い土質条件である。

- (b)に示す二期埋立て範囲では、全体的にS波速度が低く、比抵抗値が高い範囲にプロットが分布しており、液状化の可能性が高い土質条件である。
- (c)に示す一期埋立て範囲では、埋土のみならず、原地盤における探查結果も多く含まれている。三期と二期埋立ての中間的な傾向を示しており、特に、比抵抗値が50~100Ωmの範囲に多く分布している。

上述のように、滑走路延伸時期により、やや傾向が異なるが、上記の結果を液状化の可能性大、あり、小、および無しの4種類に分け、滑走路地盤の断面に適用し、図-43に示す。なお、同図は、液状化層の判定評価としては、地下水面以下から電気探査による探查深度であるGL-4.0~10mを対象としている。評価事例を見ると、二期埋立て範囲において液状化の可能性が大きい判定結果になっており、電気探査による土質判別を考慮しても、図-24の表面波探査結果における低S波速度層が卓越している範囲と比較的良く一致する結果を示している。

#### 4.2 東京国際空港における簡易液状化抵抗評価

図-44に代表地点として抽出した既存ボーリング結果および示した表面波探査および電気探査結果の比較から得られた基準化S波速度と比抵抗値の深度分布を示す。なお、液状化抵抗評価を実施するにあたり、水位は既存ボーリングの結果では、GL-2m以浅で確認されているものの、これは埋土内の宙水と仮定し、AP0.0m付近に当たるGL-5mを地下水位面と仮定した。

液状化抵抗の閾値の設定については、図-45および図-46に基準化S波速度と土質との対応、地質・土質と比抵抗の関係についてそれぞれ示す。液状化層に相当するシルト混じり砂礫およびシルト質砂礫を主体とする土質に関し、各土質により $V_{s1}$ にばらつきが認められるが、非液状化層との関係を考慮し、平均的に $V_{s1}=250\text{m/s}$ を非液状化層との閾値として設定した。一方、非抵抗値に関し液状化層に該当するプロットを確認すると、土質に拘わらず非抵抗値のばらつきが少なく、液状化層で20~30Ωmが液状化・非液状化層の境界になっている。ここでは安全側を考慮し、非液状化層との閾値を20Ωmと設定した。

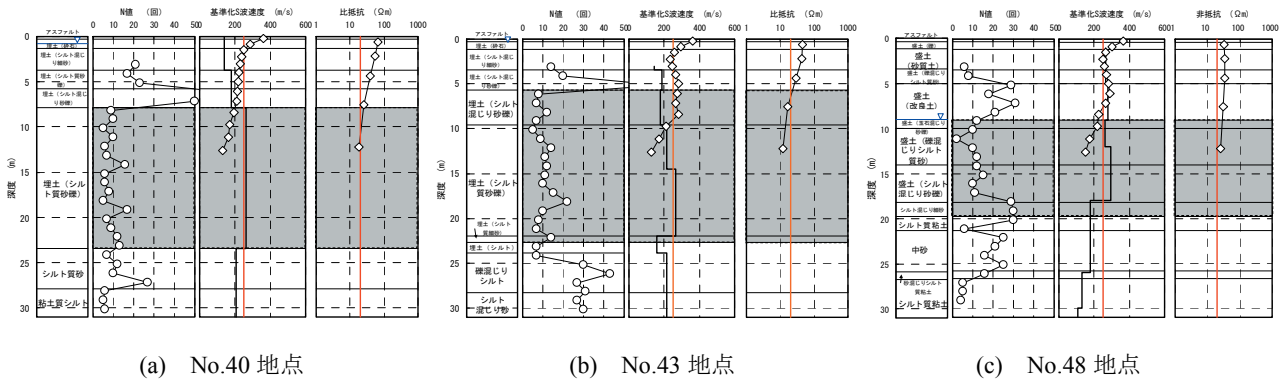


図-44 代表地点の既存ボーリング調査結果

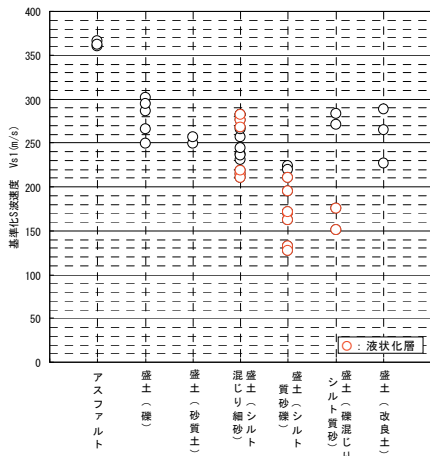


図-45 ボーリング結果に基づく土質毎のS波速度の分布



図-46 既往資料に基づく比抵抗値と探查結果の比較

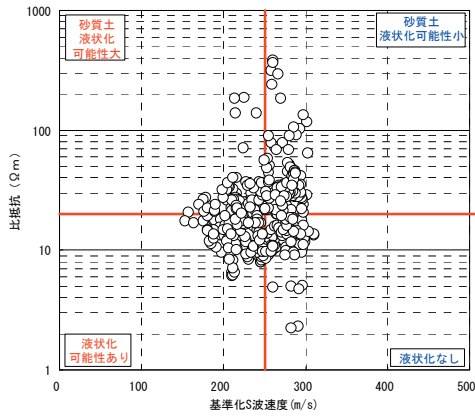


図-47 S波速度と比抵抗値の関係

S波速度と比抵抗値の関係を図-47に示す。同図は、検討対象としたGL-5～-10mの深度におけるデータをクロスプロットしたものである。プロットの分布として、液状化の可能性あり～液状化の可能性無しまでの4つの評価区分において、全体的にやや液状化の可能性のある側に偏り、かつ液状化の可能性が低い側の非抵抗値にばらつきが確認できる。

なお、探査区間の全体的な傾向としては、次のようにまとめられる。

- 高密度表面波探査では、GL-10m程度までのS波速度構造を得られており、表層の高速度層を除き、200～300m/sを示す領域が主体で、部分的に300m/sを超える箇所が存在する。
- 探査結果とCPG改良範囲の関係については、高密度表面波探査の結果から、改良体上端が地表から約10mより浅く、かつ改良によるN値の増加が平均で概ね20以上の改良体について、S波速度300m/s以上の領域として確認された。
- 電気探査では、縦断測線は距離程210m付近を境に傾向が変わる。測線前半部分は20Ω・m以下の領域

が大部分を占めるのに対し、測線後半は30～100Ω・mを主体とし20Ω・m以下の領域が部分的に存在する。測線前半・後半でその傾向が大きく変わるのは、これが埋立て工事時の工区境界などに対応し、分布する土質の傾向が異なることなども考えられる。

- 1 測線前半のうち、距離程80～120m付近はその周囲に比べ比抵抗が高く30～70Ω・mを示しているが、この区間はS波速度も180～200m/s程度で周囲より速度が遅い箇所とほぼ一致している。

上記を踏まえ、図-47を二次元断面化し、図-48に液状化抵抗評価結果を示す。同図において、地盤改良範囲の上部が評価対象深度に出現している①、④、⑤、⑥および⑦のエリアについては、液状化の可能性が小さいこと、距離程の前半部分では地盤改良範囲を除き、比較的、液状化しやすい土質特性であることが確認できる。以上のことから、今回の評価結果と地質断面やボーリング調査結果から総合的に判断し、概ね調和的な結果であると考えられる。

ただし、本検討では、設定したS波速度と比抵抗値の閾値の妥当性については、各現場、測定した時のコンディション等による影響により異なる可能性があるため、設定方法については、検討の余地があるものと思われる。

## 5. まとめ

図-1に示した液状化対策策定フローにおいて、想定されるL2地震動による未対策の場合の被災程度予測が必要である。特に、延長の長い滑走路では、その直下地盤の状況が異なることが多々ある。したがって、本研究では、通常の数100m毎のボーリング調査以外の手法として、石狩湾新港における人工液状化実験において実施した、

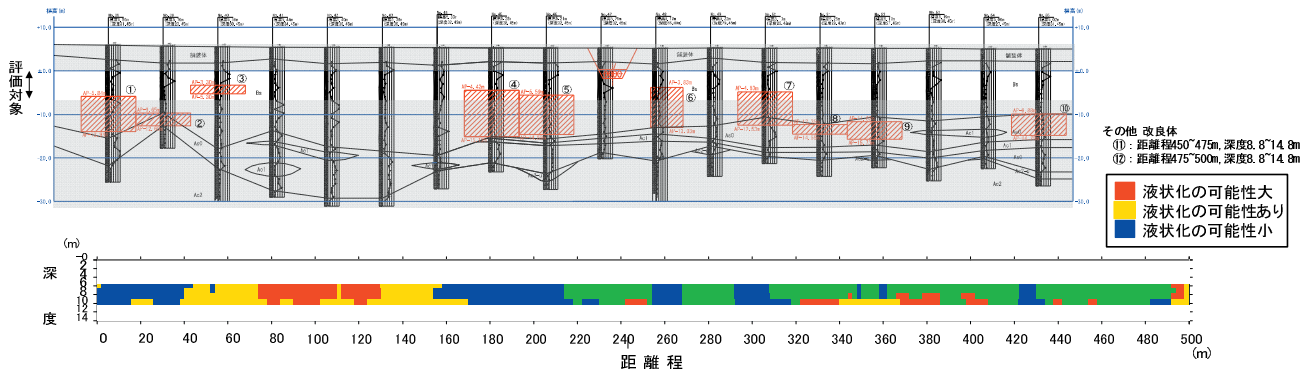


図-48 液状化危険度の評価例（東京国際空港C誘導路）

滑走路地盤の液状化前後の表面波探査結果から、特に、密増大工法範囲と未改良である液状化地盤のS波速度の変化を把握することが確認されたことを受け、物理探査により滑走路地盤の調査を実施し、地盤の評価を試みた。各種の探査事例より得た知見について以下に示す。

- 新潟空港において、施工履歴、地盤改良箇所確認および液状化層の連続性把握を目的に、表面波探査を実施した。探査結果より、地盤改良範囲についての概略を把握するとともに、空港周辺の地形の変遷と比較し、旧海岸線において埋没していた既存構造物の存在を把握することが出来た。
- 松山空港では、施工履歴確認および液状化層の連続性把握を目的に、同一測線において表面波探査および電気探査を実施した。既往のボーリング調査結果と埋立て施工履歴との比較を通じ、表面波探査結果では、各埋立て履歴毎のS波速度分布の特徴を把握した。また、電気探査では、比抵抗値がやや低めの値を示しているものの、大まかな土質分布を把握することが出来た。
- 松山空港および宮崎空港では、表面波探査のみでは、工学的基盤面までの地盤モデルを構築することが出来ないため、小規模微動アレイを探査測線上で実施し、既存ボーリングおよび表面波探査結果と統合した地層想定断面図を提示した。小規模微動アレイの実施頻度については、事前のボーリングデータの数にもよるが、決め方については、検討の余地があると思われる。
- 東京国際空港において、表面波探査および電気探査を実施し、密実化した地盤改良範囲について調べた。高密度表面波探査結果から、改良体上端が地表から約10mより浅く、かつ改良によるN値の増加が平均で概ね20以上の改良体について、S波速度300m/s以上の領域として確認出来、電気探査結果からは、縦断方向の距離程220m以降において、改良範囲の多くが低比抵抗域と一致する結果を得ることが出来た。
- 松山空港および東京国際空港において、表面波探査および電気探査結果を用いた液状化抵抗評価を実施した。本手法は、S波速度と非抵抗値の関係を整理し、液状化の可能性を評価する手法であり、探査可能深度の範囲のみを評価対象としている。得られた判定結果は、外力を考慮していないため、所謂、液状化抵抗に相当する判断指標であるが、滑走路延伸時期ごとの特徴や、あるいは地盤改良範囲を比較的良く捉える事が出来たと考えられる。ただし、評価にあたり、S波速度と非抵抗の閾値の設定については、室

内試験結果による整合性を確保するとともに、さらなるデータの蓄積が必要であると考えている。

## 6. おわりに

滑走路の被災予測をする上で、液状化層の連続性や分布を把握することが重要であるが、通常のボーリング調査では不十分であることも多いと思われる。本報で示す物理探査活用の意義は、ボーリングデータがあることを前提に、地点間の地層の補間や調査地における全体像を把握し、詳細な調査が必要なエリアを絞り込むことであり、ボーリング調査計画前に以下に示す順序での実施に留意が必要と考える。

- 既存ボーリング調査結果のおよび微地形図・古地図等を用いた地形・地質の概略把握
- 物理探査による地盤の弾性波速度構造（または強度・せん断剛性）や土質分布の把握
- 既存ボーリング調査結果および物理探査結果に基づく液状化層の連続性、層厚分布の概略把握による危険個所の抽出・絞り込み
- 上記を基にした詳細地盤調査計画の立案

また、本報でも示したが、昨今の液状化対策は低改良率や改良範囲縮小による地盤改良が多くなってきたため、今後、探査事例と検証を重ね、改良範囲や改良効果のばらつき把握等への活用についても、探査精度の向上とともに適用範囲を拡大していきたいと考えている。

(2011年11月11日受付)

## 謝辞

今回、滑走路における物理探査実施および検討事例を紹介したが、探査の実施にあたり、3箇所現場の提供をしていただいた。各現場におけるご協力の下、円滑な作業が出来、成果を得ることが出来た。関係者各位に謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 土木学会新潟震災調査委員会編土木学会：昭和39年新潟地震震害調査報告書，pp.584-588, 1966.
- 2) (財)港湾空港建設技術サービスセンター：空港土木施設耐震設計要領及び設計例 第3章 耐震性能の照査方法，pp.6-15, 2008.
- 3) 中澤博志，菅野高弘：空港における滑走路を対象とした液状化対策に関する実験的研究，土木学会論文集F, Vol.66, No.1, pp.27-43, 2010.

- 4) 菅野高弘, 中澤博志: 液状化対策に関する実物大の空港施設を用いた実験的研究, 港空研資料No.1195, 354p, 2009.
- 5) 村上弘行, 長瀬雅美, 菅野高弘, 中澤博志: 表面波探査を用いた地震被害時の舗装等の供用判断に関する現場実験, VI-083, pp.165-166, 第62回土木学会年次学術講演会, 2008.
- 6) 太田裕, 後藤典俊: 横波速度を推定するための実験式とその物理的背景, 物理探鉱, 31, 96-105, 1978.
- 7) 今井常雄, 麓秀夫, 横田耕一郎, 日本の地盤における弾性波速度と力学的特性, 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, pp.89-96, 1975.
- 8) 例えば, 馮少孔, 鍛冶義和, 杉山長志, 菅野高弘, 中澤博志, 吉田秀樹: 高密度表面波探査及び小規模微動アレイ探査を併用した空港滑走路下部地盤調査への適用例, 第44回地盤工学研究発表会, pp.1549-1550, 2009.
- 9) (財) 災害科学研究所トンネル調査研究会: 地盤の可視化と探査技術 比抵抗高密度探査法の実際, 鹿島出版会, 2001.
- 10) 林篤, 柴田東, 高橋浩之, 規矩大義, 菅野高弘, 中澤博志, 吉田秀樹: 新潟空港地盤調査に対する高密度電気探査の適用事例, 第44回地盤工学研究発表会, pp.137-138, 2009.
- 11) 国土交通省国土地理院: 国土変遷アーカイブ, <http://archive.gsi.go.jp/airphoto/>, 2010.
- 12) 国土交通省九州地方整備局宮崎港湾・空港整備事務所ホームページ, <http://www.pa.qsr.mlit.go.jp/miyazaki/html/hensen.shtml>
- 13) R.D.Andrus, K.H.Stokoe and R.M.Dhung: Draft Guidelines for Evaluating Liquefaction Resistance Using Shear Velocity Measurements and Simplified Procedures, National Institute of Standards and Technology, NISTIR 6277, 121p, 1999.
- 14) 島裕雅, 梶間和彦, 神谷英樹: 建設・防災・環境のための新しい電気探査法 比抵抗映像法, 古今書院, p.117, 1995.

港湾空港技術研究所資料 No.1247

2012.3

編集兼発行人 独立行政法人港湾空港技術研究所

発行所 独立行政法人港湾空港技術研究所  
横須賀市長瀬3丁目1番1号  
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社シーケン

Copyright © (2012) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。





古紙配合率70%再生紙を使用しています