

## 各種非破壊探査法を用いた土質情報判読精度の比較

Investigations of the subsurface geotechnical condition using various nondestructive methods

山中 稔	Minoru YAMANAKA	(香川大学工学部)
内田篤志	Atsushi UCHIDA	(基礎地盤コンサルタンツ(株)四国支店)
小野 寛	Hiroshi ONO	(アイレック技建(株)四国支店)
向谷光彦	Mitsuhiko MUKAITANI	(高松工業高等専門学校)

非破壊探査法は、地表面から地中の状態を探る基本的な調査法の一分野であり、IT 機器の伸展に連動して、様々な手法が提案・開発されている。一方、既存の調査法と新しい提案法との相互関係を調べるが必要になり、これらの導入としての取り組みが求められていた。そこで、四国で探査技術の普及と伸展を目指した研究会を立ち上げ、継続的活動を行うことにした。多くの探査法が提示されているが、ここでは数百万円程度以下のいくつかの機器を用いて、いくつかの現場比較実験を行った。その結果、目的に応じてこれらを併用・使い分けたり、既往のボーリングデータなどと融合したりすれば、様々な地盤条件で表層の土質情報を精度良く判別出来ることを示した。

キーワード: 表面波探査, 地中探査レーダー, 小型 FWD, 簡易支持力測定器

(IGC:C-8)

## 1. はじめに

四国の地盤工学的特徴として、断層起因の地すべりが多いこと、山国であるために、盛土地盤が多いことがあげられる。一方、南海地震を想定した地震動対策が早急に必要となっており、最近の新潟中越地震や北海道の地震被害からも懸念されるように、丘陵地の盛土や斜面の安定性評価の必要性が高まっている。このため、簡便で効率的かつ安価な地盤調査技術の開発とその結果を用いた地盤の健全度評価技術の開発が望まれている。

四国では、平成16年から「四国探査技術開発研究会(代表:長谷川修一)」を設立して、高精度化、多機能化、小型化へと伸展する多くの技術移転、平準化、新しい解釈、地域特性の把握を進めている。

主として比較調査、公開試験を実施しており、最近では非破壊検査の表面波探査を中心として、常時微動、地中レーダー、簡易支持力測定器や小型 FWD 試験器などの併用を行っている。平成16年度から平成17年において実施している比較調査について報告する。なお、試験器採用の基準は、単価が数百万円程度までとした。

## 2. 各種非破壊探査法の概要

今回の原位置調査において、主として用いている非破壊探査機器の概要について、以下に示す。

## 2.1 表面波探査法

表面波探査は、地盤の地表付近を伝わる表面波(レイリー波)を多チャンネルで測定・解析することにより、深度20m程度までの地盤のS波速度を求める技術である。S波速度は物質の硬さなど

の工学的な目安となる剛性率に直接関係する値であり、地盤の動的特性の把握・検討などには不可欠なパラメーターであり、表面波探査を用いることにより広範囲のS波速度構造を簡単に把握することができる。

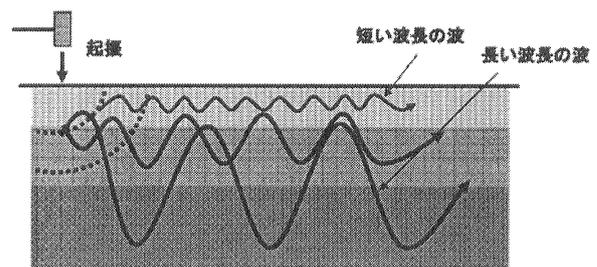


図-1 表面波探査の原理

図-1に表面波探査の原理を示す。かけや等で地表を加振すると弾性波が発生し、地中ならびに地表を伝播していく。このうち、地表近傍を横方向に伝播するものを表面波と呼ぶ。不均質な地盤の表面付近を伝わる表面波(レイリー波)は、その波長(周波数)によって伝播速度が変化する。一般の地盤では、深度とともに弾性波速度が増加するが、表面波は長い波長ほど深部の速度も反映するので、短い波長(高周波数)では速度が遅く、長い波長(低周波数)では速度が速くなる。波長(周波数)による伝播速度の違い(分散)を逆解析することにより、不均質な地盤のS波速度構造を求めることができる。

従来の表面波探査では、2, 3個の受振器を用いて測定・解析を行っていたが、今回計画した手法では36個の受振器を用いる。これにより、表面波の基本モードを確実に検出することができ、精度良く分散曲線を求めることができる。

表面波探査の特徴および限界についてまとめる

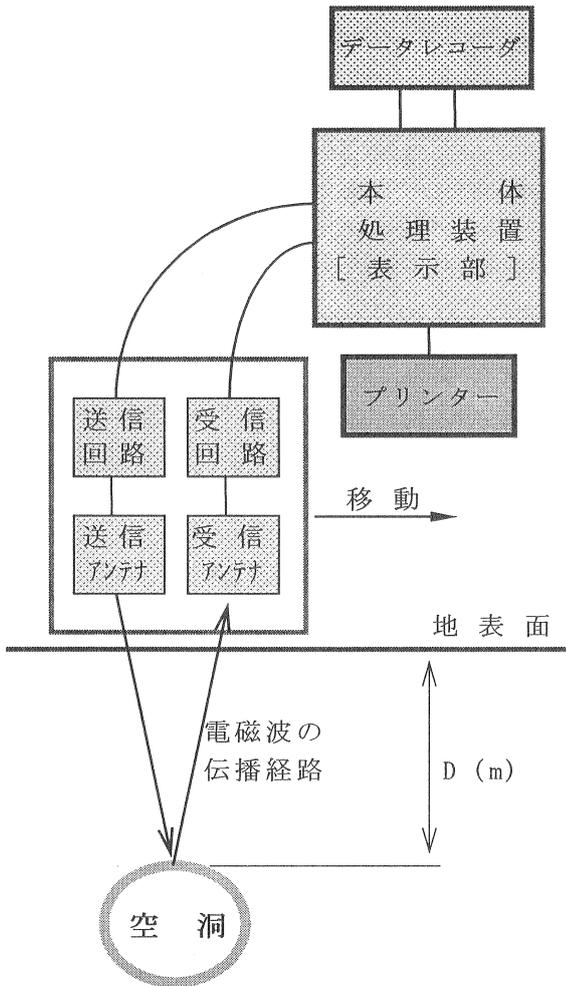


図-2 地中探査レーダーのシステムの概要

と、以下のようになる。

〔表面波探査の特徴〕

- ・地表から非破壊で地盤の二次元的な S 波速度構造が求まる。
- ・測定時間が短いので広い範囲（400m/日）を迅速に調査できる。
- ・アスファルト上からの探査が可能である。
- ・測定・解析が簡単である。
- ・火薬は必要ない。

・ S 波速度は N 値との相関が良く、標準貫入試験やサウンディング等と合わせて実施することにより、地盤の二次元的な N 値構造を推定することができる。

〔表面波探査の限界〕

- ・分解能が低い。分解能は探査深度の半分程度である（探査深度が 10m の場合、探査可能な異常領域の大きさは 5m 程度である。）
- ・ S 波速度は地質の違いに敏感である。（砂や礫は高速度、粘土は低速度となる。）

2.2 地中探査レーダー法

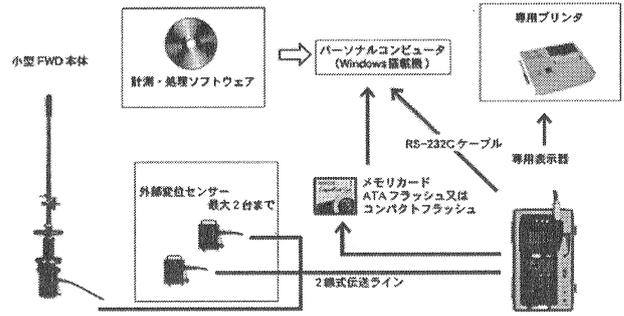


図-3 小型 FWD 試験のシステム概要<sup>3)</sup>

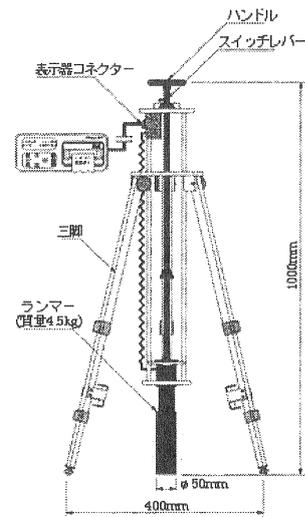


図-4 簡易支持力測定器のシステム概要<sup>4)</sup>

地中探査レーダーの原理は、現在広く用いられている一般のレーダーと基本的には全く同じである。地中探査レーダーは、電磁波をアンテナから地中に向けて放射し、その電磁波が土と電気的性質の異なる物質、たとえば埋設管、空洞、地下水などの反射物体との境界面で反射され、再び地表に出て地表近くに置いた受信アンテナに到達するまでの時間から、反射物体までの距離（深さ）を計り、アンテナを地表面で移動することにより、水平位置を測定する。

地中探査レーダーシステムの概要を図-2 に示す。送信回路から数ナ秒（ナ秒=10<sup>-9</sup>秒）のインパルス信号をアンテナに送り、電磁波をアンテナから放射する。地中に空洞等が存在すると、土と空洞（空気）との比誘電率（土：6～30、空気：1）の相違により、その境界面で電磁波は反射する。この反射波を再びアンテナで捕らえ、本体装置において反射波の受信までの時間を測定する。実際の探査に際してはアンテナを移動させ、所定の移動距離毎（例えば 2cm 毎）に信号を受信し、本体表示部で地中断面の画像を作成する。その画像の中から空洞と推定できる観測パターンを特定

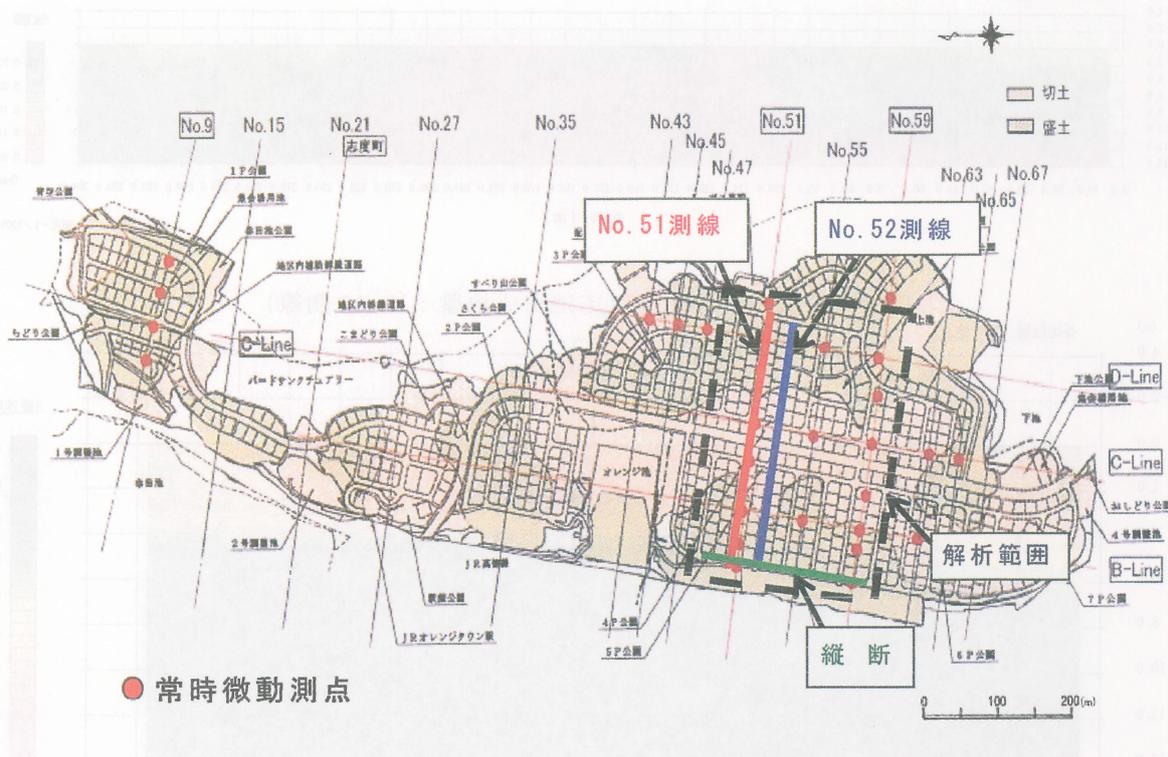


図-5 宅地造成地盤調査の平面図

し、次式により電磁波の受信までの時間  $T$  を深度に換算し、空洞の深度  $D$  を算出する。

$$V = C / \epsilon^{1/2} \quad (\text{m/s}) \quad (1)$$

$$D = V \cdot T / 2 \quad (\text{m}) \quad (2)$$

$C$  : 真空中での電磁波速度 (m/s)

$T$  : 電磁波の受信までの往復伝播速度

$\epsilon$  : 比誘電率

比誘電率  $\epsilon$  は、現地において深度が既知の埋設管等の探査を行うことにより決定しているが、土質や水の含有率等により左右され探査場所によって変動するため、探査した空洞や埋設管の深度には多少の誤差が生じる場合がある。

### 2.3 小型 FWD 試験法

小型 FWD 試験 (Portable Falling Weight Deflection Test) は、載荷板上に重錘を自由落下させることにより衝撃荷重を加え、これにより生じた変位量を荷重中心と荷重中心から半径方向の位置で測定するものである。「土木学会 舗装工学委員会編：FWD および小型 FWD 運用の手引き (2003.1)」及び「財団法人 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説・省力化軌道用土構造物」に準拠している。図-3 にシステムの概要を示す。

従来の平板載荷試験器と比較しても、格段の試験時間の短縮が図れ、地盤の剛性を評価する上で、ひとつの指標となる地盤反力係数  $K_{30}$  相当値を算出する。小型 FWD は、盛土・切土・路床・路盤の土構造物の締固め管理や剛性 (地盤反力係数  $K_{30}$  相当値、弾性係数) の評価、及び簡易アスファルト舗装、インターロッキングブロック舗装などの支持力測定や剛性の評価に適用されている。

### 2.4 簡易支持力測定試験法

一般に、構造物の基礎地盤や道路の路床部などの支持力を求めるには、平板載荷試験、現場 CBR 試験などが用いられているが、これらの試験は大きな反力が要るなど煩雑で、試験結果がでるまでにかかなりの時間を要する。簡易支持力測定器は、これらの欠点を解決して、地盤の支持力を即座にしかも簡単に測定できるので、施工の効率化と省力化を図ることが可能である。特徴としては、以下の4点が挙げられる。

- ・基礎地盤の支持力などを即座に測定できるので、施工の効率化を図ることができる。
- ・操作方法が簡単なので誰でも利用でき、測定時間が短くて済む。
- ・測定の三脚を援用した設計であり、持ち運びが便利で狭い空間でも使用できる。
- ・衝撃加速度法を使用しているため、測定に大きな反力を必要としない。

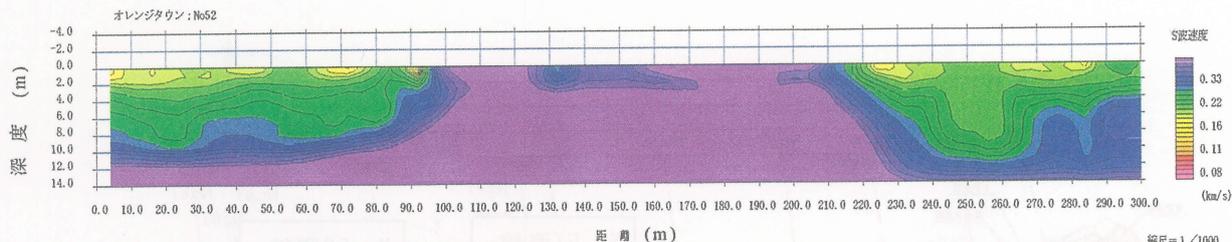


図-6 S波速度分布図（宅地造成地盤：No.52 測線）

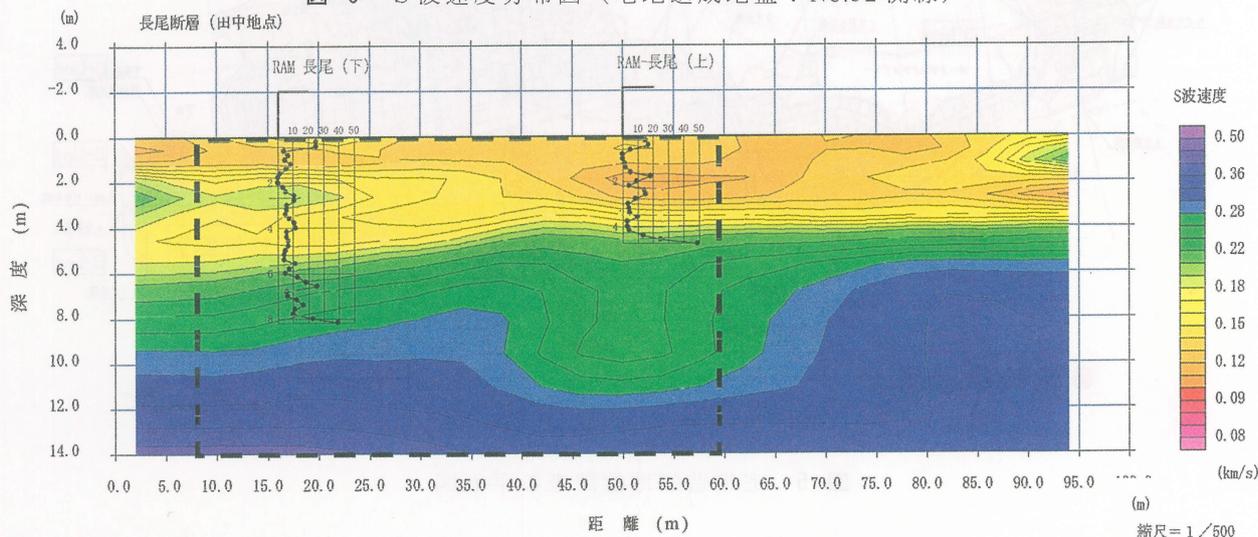


図-7 S波速度分布図（活断層：田中地区）

直径φ50mm、質量4.5kgのランマーを45cmの高さから地面に自由落下させたときに生じる衝撃加速度を、ランマーに内蔵した加速度計で測定し、その衝撃加速度の最大値（Ia）とそれに相当するCBR値、K30値、N値などをディスプレイに表示する方式になっている。図-4にシステムの概要を示す。

### 3. 各種原位置調査による相互比較事例

平成16年度より、四国内で実施してきた各種原位置調査について、概略的に報告するとともに、各調査において明らかになったこと、問題点などを示す。なお、紙面の関係で各調査について、全て等しく報告することができないので、特徴的なものについてのみ詳細検討を加えることにする。

#### 3.1 宅地造成地盤への適用

図-5に調査地の平面図、および表-1に検討した宅地造成地盤の概要を示す。

表-1 宅地造成地盤の調査概要

位置	香川県さぬき市オレンジタウン
日時	平成16年4月16日(金)13:00~17:00
調査項目	表面波探査、常時微動、ラムサウンディング
状況	・最大盛土層厚が25mに及ぶ。 ・切土と盛土の不整合の検討。
備考	・公開実験、四国内および関西から50名以上の技術者、発注者の参加あり。多くの新聞・TV報道される。

地盤のS波速度を地表からの探査により簡便に把握できる表面波探査を用いて測定し、代表的な造成地盤の二次元的なS波速度構造を推定した。さらに、造成地盤において常時微動測定を行い、当該地盤の卓越振動数を評価するとともに、地盤種別の判定を行った。

周辺は、標高100~200mの小起伏の発達した低い山地が分布する地域である。山地は、開析が進み南東~北西方向、南~北方向に伸びる谷地形が卓越している。

造成地の西側には南~北方向へ延びる幅100m、

各種非破壊探査法を用いた土質情報判読精度の比較

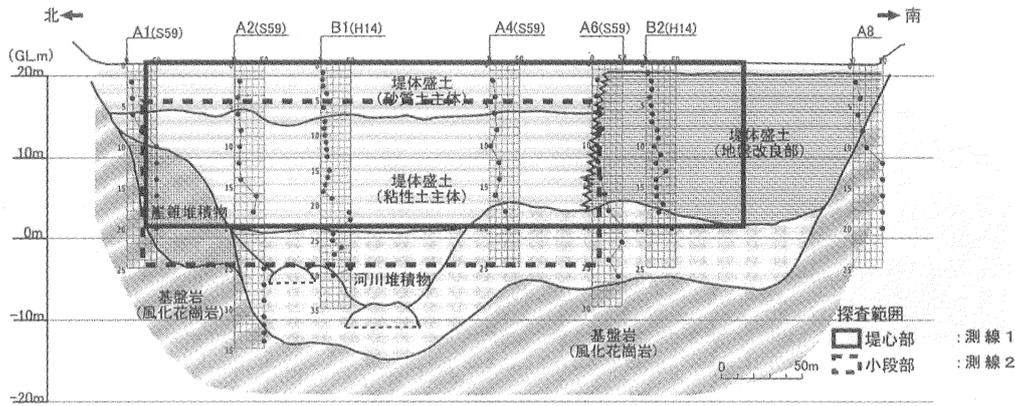


図-8 既往調査断面図および探査範囲 (ため池堤体)

標高 20~30m の谷底平野が形成されており、この低地内を並走して JR 高徳線、県道山川線が通過している。当地区の谷部では水田、山麓緩斜面では果樹園が発達しているが、これらは、谷部に点在するため池からの配水により形成されたものである。

オレンジタウンの位置する場所の基盤地質は、中生代白亜紀の領家花崗岩類に属する花崗岩である。第三紀の讚岐層群に属する流紋岩が岩脈として出現するが、層厚は薄く、これらの上位を崖錐堆積物および谷底堆積物が被覆している。

地質図では、周辺部に断層の明示はなく、踏査でも小断層がごく一部に確認されている程度である。したがって、大きな岩盤劣化を伴う断層破砕帯は存在しないものと推定されている。地下地質は下位より、基盤岩である花崗岩、谷底堆積物、盛土層 (最大盛土厚 25m) より構成される。弾性波探査結果によれば切土部において、造成面は軟岩 ( $V_p=2.0\sim 2.3\text{km/s}$ )、および中硬岩 ( $V_p=4.0\sim 4.5\text{km/s}$ ) 程度の岩盤であることから堅硬な基盤といえる。

表面波探査は図-5 に示す No.51 測線、No.52 測線、縦断測線の 3 測線において実施した。

図-6 に、No.52 測線の S 波速度分布図を示す。始点側および終点側の表層部で、S 波速度  $V_s=200\text{m/s}$  以下の層が見られるが、その厚さは最大で 2 m 程度である。その下位は  $V_s=200\sim 300\text{m/s}$  の層が厚く分布し、最下部は  $V_s=500\text{m/s}$  を超え、最大で  $V_s=1000\text{m/s}$  以上となる。

既往調査では、花崗岩主体の山地を切土した箇所は  $V_s=300\text{m/s}$  を超え、一方、盛土の大半は S 波速度が  $V_s=200\sim 300\text{m/s}$  層に相当し、盛土の厚い箇所および終点側の法肩付近の表層のみ  $V_s=200\text{m/s}$  以下の S 波速度を示していた。

表-2 宅地造成地盤の S 波速度と地盤分類

S 波速度 $V_s$ (m/s)	層厚	対応する地盤・地質
~200	0~2m	盛土 (ごく表層部)
200~300	0~15m	盛土 (中心部)
300~		岩盤 (切土部)

表-2 に、表面波探査で得られた S 波速度と対応する地盤・地質との関係を示す。盛土部のごく表層部に  $V_s=200\text{m/s}$  以下の箇所があるが、大半は  $V_s=200\sim 300\text{m/s}$  である。切土部は  $V_s=300\text{m/s}$  以上を呈し、基盤岩である花崗岩に対応する。

調査対象の宅地造成地盤は、巻き出し厚さ 30cm ごとに、19t 級振動ローラーで 6 回転圧・締固めを実施しており、盛土部の強度は新幹線盛土と同等程度の大きさが期待できることから、上記 S 波速度はほぼ妥当な値であると考えられる。

表面波探査を宅地造成地盤に適用した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 表面波探査により、造成地の地盤の S 波速度を調査した結果、盛土部の大半は  $V_s=200\sim 300\text{m/s}$  であり、一部表層のごく薄い箇所でも  $V_s=200\text{m/s}$  以下である。
- 2) 表面波探査の S 波速度構造と既往調査結果図は、ほぼ同じ構造を示す。
- 3) 常時微動による計測によると、盛土部では 0.2~0.3 秒を卓越周期とする明瞭なスペクトル比のピークが見られる。次元波動論によれば、盛土部の平均的な S 波速度は  $V_s=260\text{m/s}$  程度と推定され、表面波探査の結果と同等である。
- 4) 盛土としては S 波速度が高いが、締固めが十分であり骨材も花崗岩であることから、ほぼ妥当な値であると考えられる。

3.2 活断層への適用

表-3 に検討した活断層宅地造成地盤の概要を

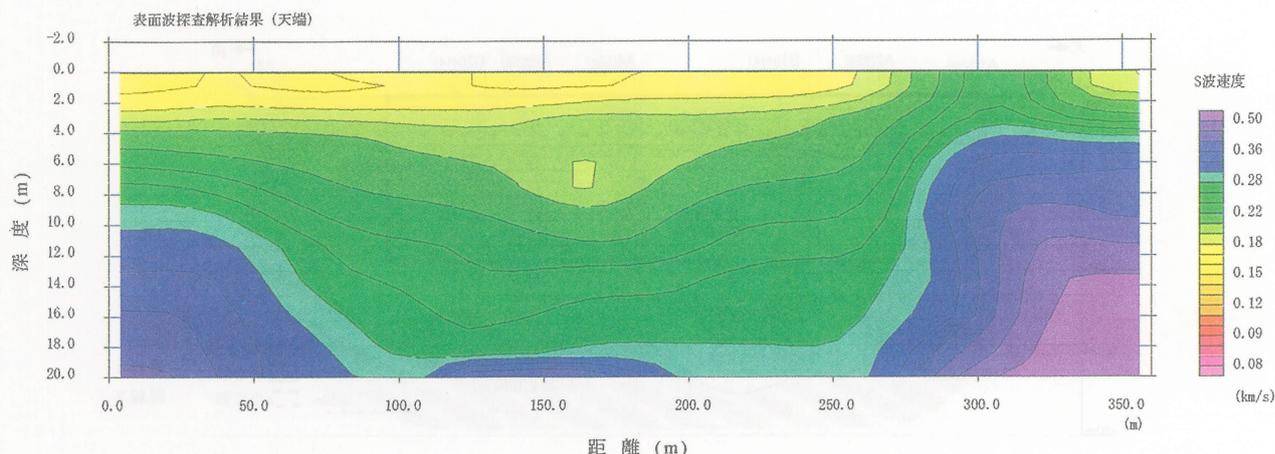


図-9 S波速度分布図（ため池堤体，測線1）

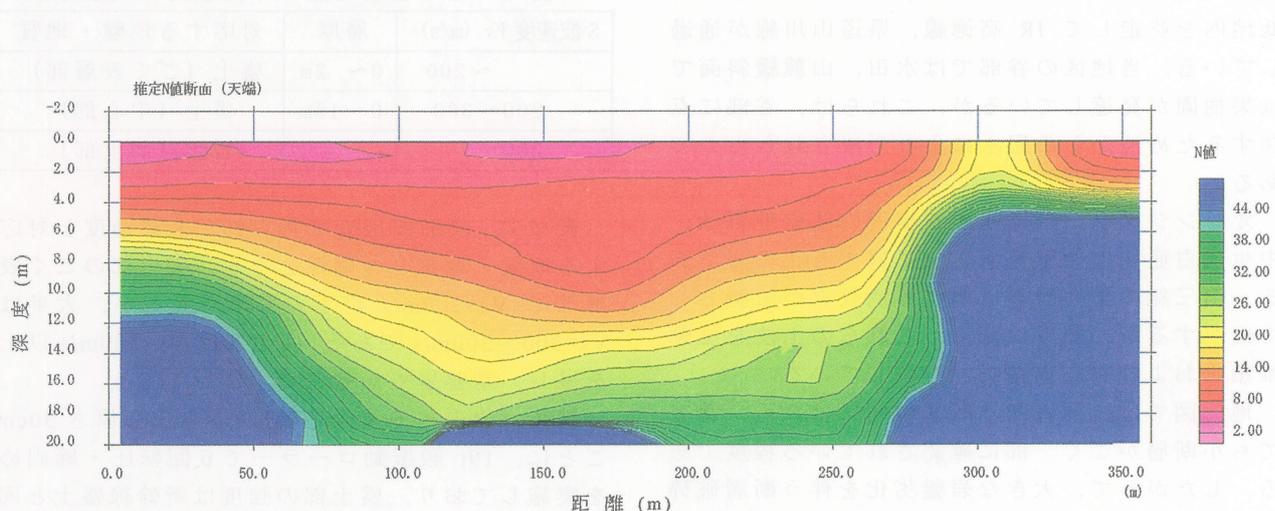


図-10 S波速度から推定したN値断面（ため池堤体，測線1）

示す。

表-3 活断層地盤の調査概要

位置	香川県木田郡三木町田中,氷上宮下地区
日時	平成16年4月17日(土)
調査項目	表面波探査, ラムサウンディング
状況	・活断層調査でトレンチ, ボーリングの既往データとの照査
備考	・非公開

図-7に、田中地区における表面波探査によって得られたS波速度分布図を示す。図中、小型動的貫入試験による換算N値を併記している。また、波線で囲んだ範囲は、過去に物理探査が行われており、その結果の地層構造と傾向がほぼ一致する。S波速度分布より、地表面から深度4m付近まではS波速度100~200m/sの低速度部があり、その下位には、S波速度コンターが大きく湾曲してい

る。南側部（紙面で右側）には、S波速度300m/s以上のより密に締まった部分が存在している。このS波速度コンターが大きく湾曲する箇所は、地質調査及びボーリングデータから推定される断面の箇所とほぼ一致する。

表-4 活断層のS波速度と地盤分類

S波速度 $V_s$ (m/s)	換算N値	対応する地盤・地質
~200	~10	盛土・段丘堆積物
200~300	10~30	シルト層, 砂層
300~	30~	砂礫層

表-4に、本調査で得られたS波速度と換算N値及び対応する土質を示す。地表部のS波速度200m/s以下の低速度層は、換算N値10以下、盛土・段丘堆積物に対応する。より下位は、第三紀層の砂礫層等に対応することが明らかとなった。

表面波探査を活断層に適用した結果、以下のこ

とが明らかとなった。

- 1) 三木町田中地区では、S波速度分布より、地表面から深度4m付近まではS波速度100～200m/sの低速度部があり、その下位には、S波速度コンターが大きく湾曲している箇所があることが判明した。南側部にはS波速度300m/s以上のより密に締まった部分が存在している。このS波速度コンターが大きく湾曲する箇所は断層面の箇所とほぼ一致することが分かった。
- 2) 三木町氷上宮下地区では、S波速度が地表部4～5mの段丘堆積物で200m/s以下であり、その下位の三豊層群や蛇紋岩、変質花崗岩類のS波速度と明瞭に区分できる。S波速度コンターが湾曲する箇所の中央部が、断層面と推定できることが明らかとなった。
- 3) 両地区での結果から、表面波探査結果であるS波速度分布から、明瞭な層序や断層面を、判読することはある程度可能であると言える。すなわち、活断層に関する情報が何も無い箇所であっても、断層面の概要抽出できる可能性がある。
- 4) したがって、地表調査やボーリング調査で活断層の位置が不明瞭な箇所での予備調査として、表面波探査が機動的であり短時間で調査が終了するために、十分効果的であると言える。

### 3.3 ため池堤体への適用

図-8に既往調査断面図および探査範囲、また表-5に検討したため池堤体の概要を示す。

表-5 ため池堤体地盤の調査概要

位置	高松市鶴市町水道局御殿浄水場貯水池
日時	平成16年7月29日(土)10:00～12:00
調査項目	表面波探査, 常時微動
状況	・地盤改良箇所の抽出, 基盤面との関係, 漏水箇所の変状.
備考	・公開実験, 四国内から30名以上の技術者, 発注者の参加あり. 多くの新聞・TV報道される.

図-9に測線1における表面波探査によるS波速度断面を示す。これより、右側部にS波速度が急激に高く変化する箇所があり、この箇所は昭和60年代に実施された遮水のためのグラウト工の箇所と一致する。一方、別途調べた測線のS波速度断面より、堤体と地山の境界部が判別でき、地山が傾斜していることが分かった。

表-6 ため池堤体のS波速度と地盤分類

速度区分		S波速度 Vs (m/s)	層厚(m) [推定N値]	対応する 地盤・地質
II層	上部	170～ 200	5～8 [10]	堤体(砂礫質)
	下部	200～ 300	10～13 [10～30]	堤体(粘土質)
I層		300～	—	地山(河川堆積物, 崖錘, 風化岩盤) 堤体(改良部)

図-10に、今井他<sup>5)</sup>のN値とS波速度Vs(m/s)の回帰式を用いてS波速度構造から推定N値断面に変換した図を示す。地山と堤体との境界や改良体の位置が明瞭に判別できている。

表-6に、得られた解析結果と既往の土質結果との比較を示す。速度層区分からは、測線1の最下端と測線2の下部および測線1の終点側に出現する300m/s以上の層(以下、I層)と、これより上位の200m/s前後の速度層(以下、II層)に大別できる。また、II層は200m/s以上の下部層(以下②下部層)と200m/s以下の上部層(以下②上部層)に速度層構造を分割できる。なお、これらの層区分は、既往の調査資料によるN値分布と良く対応することを確認している。

ため池堤体の調査に表面波探査を適用した結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 堤体部と地山(基盤層)との境界部を明瞭に判別することが可能である。
- 2) 改良箇所についても強度が大きいものについては、速度構造に顕著に表れ、改良位置の判読に威力を発揮する。
- 3) 漏水やパイピングホールなどの小規模な物性の違いは抽出できなかった(実際の目視観察においても漏水やパイピングホールはなかった)。

### 3.4 河川堤防への適用

表-7に検討した河川堤防の概要を示す。

表-7 河川堤防地盤の調査概要

位置	高知県南国市鏑野川兩岸
日時	平成17年4月27日(水)9:00～17:00
調査項目	表面波探査, 地中レーダー, 簡易支持力測定器, 小型FWD
状況	・測線長・左岸280m, 右岸275.38m, 比較的小規模な河川堤防の現状調査, 陥没箇所の指摘.
備考	・一部公開

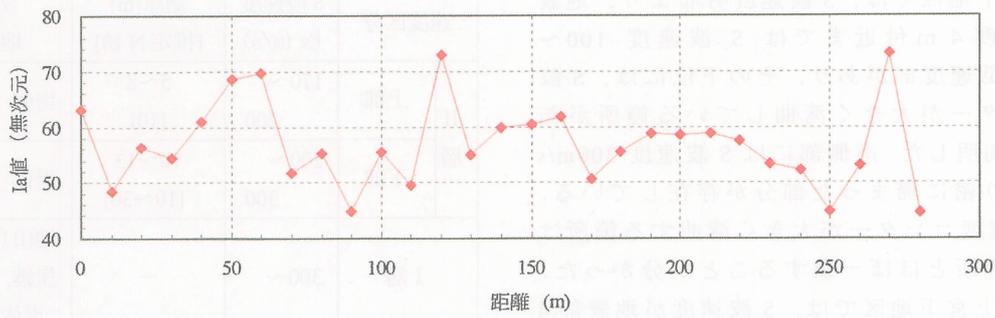


図-11 測定距離とインパクト値(Ia)の関係 (河川堤防, 左岸, 簡易支持力測定器)

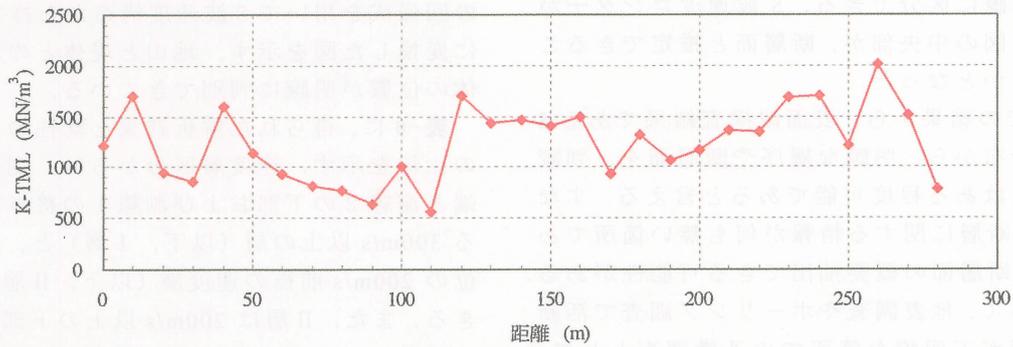


図-12 測定距離と地盤反力係数(K-TML)の関係 (河川堤防, 左岸, 小型 FWD)

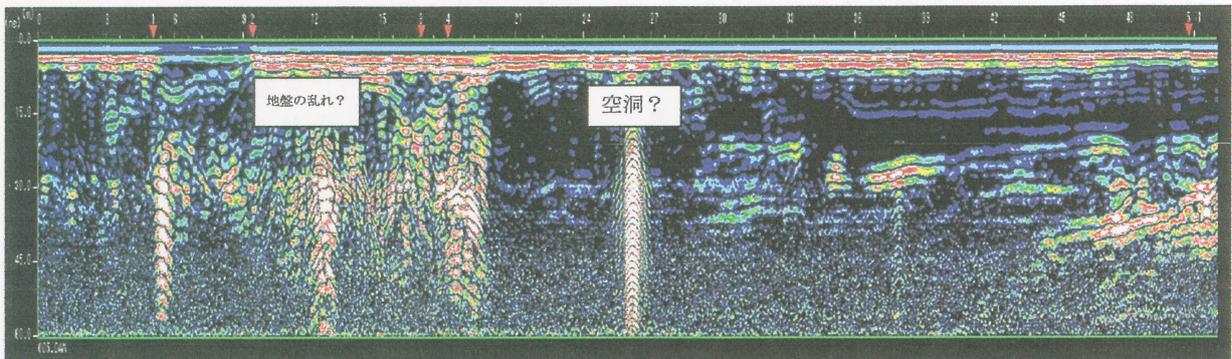


図-13 測定距離と探査結果 (河川堤防, 左岸, 地中レーダー, 200~250m付近のみ, 深度は3m程度)

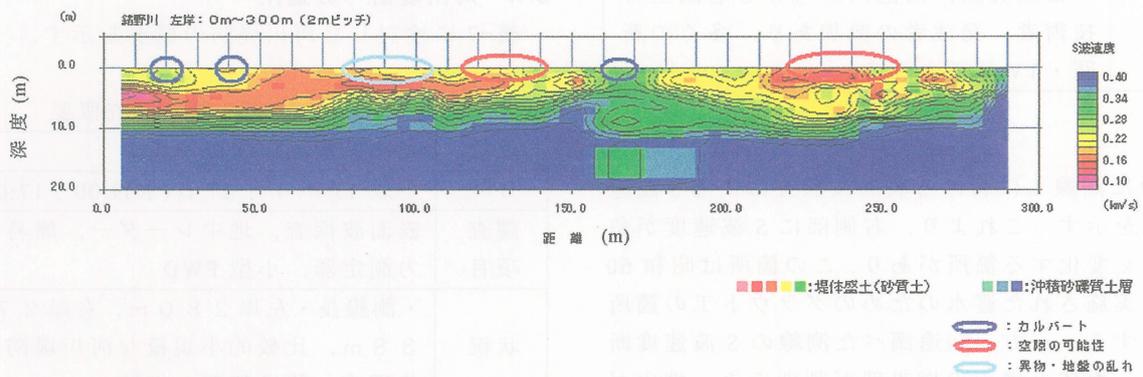


図-14 測定距離と探査結果 (河川堤防, 左岸, 表面波探査)

ここでは、紙面の関係で左岸のみの比較検討を行う。図-11には簡易支持力測定器による結果、図-12には小型FWDによる結果、図-13には地中レーダーによる結果、および図-14には表面波探査と地中レーダーの比較をそれぞれ示す。

本調査地は、鯖野川に沿った堤防道路で、平成16年に入り路面の陥没事故が度々発生している。対象地は後川の支流である鯖野川の堤防に当たり、周辺は一面標高4m程度の水田が広がる低地である。また、物部川流域の香長平野であり、神母木を扇頂とした扇状地の末端部に近く、上部から砂礫を中心とした沖積層が厚く分布している。大部分が砂礫主体であるが表層部など、部分的には軟弱粘性土層の分布も想定される。変状原因として、締固め不足による堤体の不均質性に伴う陥没、旧河道による支持地盤の凹凸、護岸背面の空洞化などが考えられている。

まず、図-11と図-12の簡易支持力測定器と小型FWDの調査比較について述べる。右岸と左岸の比較では、いずれの調査法でも左岸の方がばらつきは大きく、かつ軟弱な傾向を示している箇所が存在していると推察される。

また、図-13と図-14の表面波探査と地中レーダーの調査比較について述べる。地中レーダー探査で現れたカルバートや、空隙可能性箇所は表面波の解析結果では明瞭に見えていないのが分かる。表面波解析結果では、左岸200m～250m地点のS波速度は他の地点よりも低下しており、軟弱な地盤である可能性が考えられた。地中レーダー結果においても、同地点では水分を含んだ地層あるいは空隙がある可能性が見られた。このことから、左岸200～250m地点は旧河道の影響を受けた軟弱な地盤で、今後路面陥没などの変状が起こる恐れも考えられる。

#### 4. まとめと今後の展開

地域に活用を促すためには、多種多様な地盤条件でデータ蓄積が欠かせない。今回は関係機関の

ご協力でかなり広範囲のデータ蓄積が行えたことは幸運である。あるいは、非破壊検査といっても比抵抗やその他まだ多くの調査法がある。最適な採用基準や、N値に変わる調査法の探求と普及を進めて、具体的な技術的内容を理解していただけるよう、啓蒙活動を続けなければならない。現地公開試験や実務者の方から、ある程度頻繁に質問される内容を整理して、Q&A形式に整えていくことも一案だろう。地盤の地域性もあり、今後も継続的活動を行う予定である。

#### 謝辞

現地探査の実施に当たり、四鉄不動産(株)、高松市水道局、国土交通省四国地方整備局高知河川国道事務所、高知県南国土木事務所、応用地質(株)、及びその他多くの方々に場所の提供、資料提示などのご協力を拝した。ここに感謝の意を表します。

#### 参考文献

- 1) 山中 稔, 長谷川修一, 斎藤章彦, 向谷光彦, 林 宏一, 市原 健: 人工振源を用いた表面波探査法によるため池堤体の強度推定の試み, 平成16年度農業土木学会中国四国支部講演会講演要旨, pp.82-84, 2004.
- 2) 山中 稔: 人工振源を用いた表面波探査の土地質調査への適用, 第8回建設事業の技術開発に関する助成事業, 成果報告集, (社)四国建設弘済会, pp.139-170, 2005.
- 3) 向谷光彦, 岡崎芳行他: 小型高精度な原位置測定器を用いた表層地圏環境の評価, 技術交流会2004論文集, 高松工業高等専門学校, pp.80-81, 2004.
- 4) 諏訪隼人, 向谷光彦, 土居正信他: 衝撃加速度法を用いた地盤の応答特性に関する研究, ハイテクシンポジウム2003論文集, 高松工業高等専門学校, pp.71-74, 2003.
- 5) 今井常雄他: 第4回日本地震工学シンポジウム論文集, p.92, 1975.

(2005年7月29日 受付)