

表面波探査

渡邊 康二*

* WATANABE Koji、ビイック(株) 先端技術開発センター 次長 東京都文京区本駒込 6-12-16

1. はじめに

表面波（レイリー波）探査は物理探査の一種である。起振機やカケヤ等による打撃を用いて、地盤に人工的に発生させた表面波を、地表面に設置したセンサーにより受信する。センサーを一定間隔に設置することで、弾性波の速度を計測する。表面波は、周波数によって伝搬する深度が異なるという性質を持つことから、入力信号の周波数解析を経ることで、地盤の速度構造を求めることができる。

表面波速度は、S波速度に近似する。このことから、S波速度と同様に、N値や弾性係数等の地盤定数との相関性を利用することで、戸建て住宅の地盤評価を行うことができる。

センサー2～3個を“測点”として設置する起振機方式と、24～48個を“測線”として設置する多チャンネル方式とがある（図-1、図-2参照）。



図-1 表面波探査機（起振機方式）

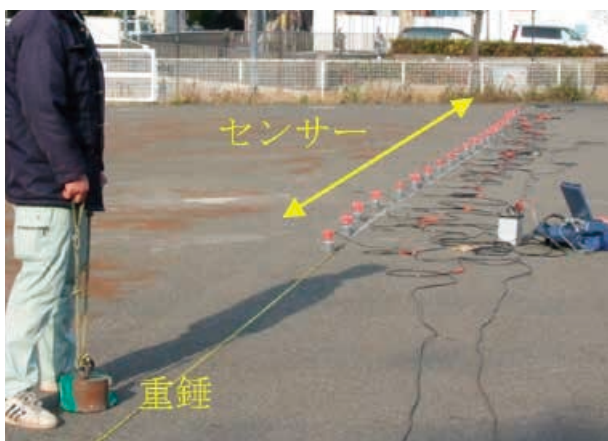


図-2 表面波探査機（多チャンネル方式）

2. 試験概要

表面波探査は、“振動”を用いた調査方法である。

地表面に起振機の振動、衝撃などを与えて、地面を振動させる。この結果、様々な波が励起するが、地表面に沿って伝わってゆく“表面波”も発生する（図-3参照）。

表面波探査は、地表面に設置したセンサー間の位相差（センサーを通過する時間差）より、この表面波の速度を測定する（図-4参照）。

表面波は、“分散性”という性質を有している（図-5参照）。表面波の比較的高い周波数成分は、地盤の浅い範囲を伝搬する。比較的低い周波数成分は、深い範囲までを、地表面に沿って伝搬していく。周波数解析を実施し、周波数毎の位相速度をデータとして蓄積する。

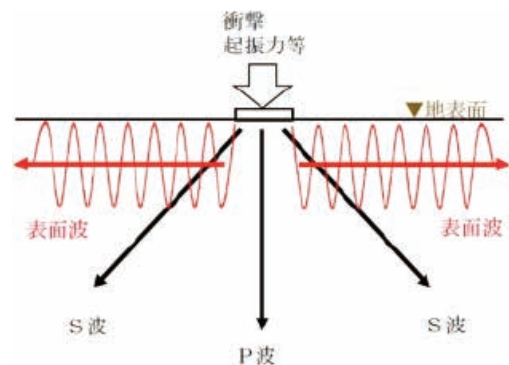


図-3 地表面で発生する波動の卓越方向

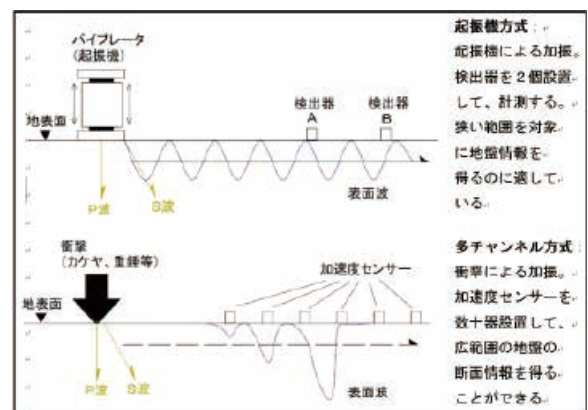


図-4 表面波探査の機材の設置

上：起振機方式（2ch） 下：多チャンネル方式

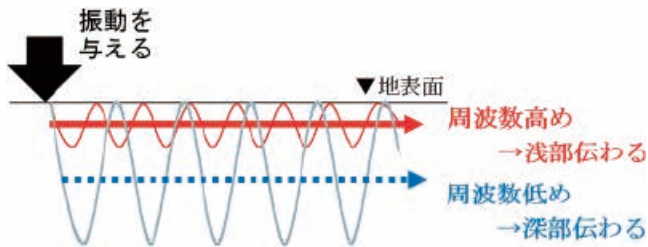


図-5 表面波の分散性

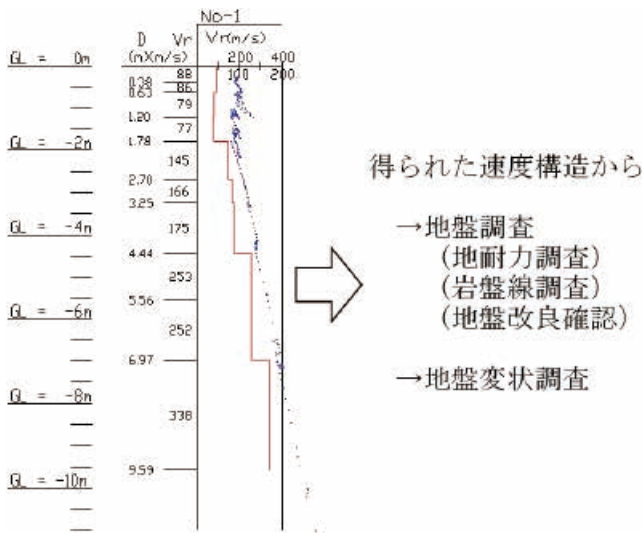


図-6 データ例と調査結果の適用

地盤を振動させ、表面波の持つ性質を利用し、詳細な周波数解析を行い、地盤の浅い範囲から深い範囲までの計測（周波数領域の速度分布データの収集）を行う。

算定方法は数種あるが、周波数領域の速度分布から、深度-速度分布（速度構造）を算定し、これが表面波探査の計測データとなる。（図-6 参照）

3. 留意点

3.1 長所・短所

表面波探査は、弾性波探査の一手法で、物理探査に該当し削孔を伴わない非破壊方式の試験である。以下のような長所・短所を有する。

表面波探査の主な長所・短所

〈長所〉

- ・ 非破壊試験である
- ・ 1回の計測時間が比較的短時間（30分前後）
- ・ 起振機を用いる場合、試験の再現性が高い
- ・ すべての機材が人力で運搬が可能
- ・ アスファルト舗装上でも計測は可能
- ・ 地下水位の影響を受けない

〈短所〉

- ・ 土質の判断はできない
- ・ 地下水位の確認はできない
- ・ 単独では杭形状の基礎、地盤対策の設計の為の調査として、不向きである

- ・ 著しい振動（隣地で重機が動いている等）があると精度が低下する可能性がある
- ・ 地表面にコンクリート舗装（有筋）があると以深の地盤情報の取得は困難となる

現場計測、データ解析については、各メーカーによりマニュアルが整備されており、またWGやNPO団体などで技術監修を行っているメーカーもある。

各社の技術思想を理解し、マニュアルに則った計測・解析を行うことが、より正確な地盤情報を得ることにつながる。

3.2 技術背景

表面波速度はS波速度に近似する¹⁾

$$V_s = \frac{V_r}{0.954}$$

ここに
 V_r : 表面波速度 (m/s)
 V_s : S波速度 (m/s)

S波は、従前より地盤工学的な数値として利用されており、さまざまな地盤定数との相関性が、学会等で提示されている。

- ・ S波速度とN値²⁾

$$V_s = 100N^{1/3} \quad \text{但し粘性土の場合} \quad (1 \leq N \leq 25)$$

$$V_s = 80N^{1/3} \quad \text{但し砂質土の場合} \quad (1 \leq N \leq 50)$$

- ・ S波速度と剛性率G、一軸圧縮強度 q_u ^{3) 4)}

$$G = \frac{\rho V_s^2}{9.8}$$

ここに
 N : N値 (回)
 ρ : 単位体積重量 (kN/m³)
 G : 剛性率 (kN/m²)
 q_u : 一軸圧縮強度 (kgf/cm²)

$$V_s = 134 q_u^{0.443}$$

このように、表面波探査によって得られる表面波速度値から、種々地盤定数に換算することができる。

ただし、前述のように、表面波探査は非破壊試験であり、低ひずみ状態において計測を行っている。また、地盤定数についても、試験内容（試験方法、試験時のひずみレベル）を理解するべきと考える。

これらのことから、表面波探査により得られた速度値から地盤定数を換算する場合は、“バラつき”があることを念頭におき、安全係数を用いる、実績などから妥当性を判断するなど、扱いには注意を要する。

3.3 告示第1113号

表面波探査は、小規模建築物築造の際の地耐力（許容応力度）調査に、平成元年ころから適用されている。

平成13年国土交通省告示第1113号に、地盤の許容応力度の調査方法十種、並びに計算式が明記されている。表面波探査は物理探査の一種であり、本告示に則った調査方法である。

表面波探査を実施し、速度値から換算した地盤定数（粘着力 c 、等）を、上記の告示式の第2の(1)の式に代入することで、法規に則った形で許容支持力度の算定を行うことが出来る。

また、剛性率Gから、地盤ばね値を求め、建物築造時の沈下量予測計算を行うことも可能である。⁵⁾

告示 平13国土交各第1113号

第1 地盤の許容応力度及び基礎ぐいの許容支持力を求めるための地盤調査の方法は、次の各号に挙げるものとする

- 一 ボーリング調査
- 二 標準貫入試験
- 三 静的貫入試験
- 四 ベーン試験
- 五 土質試験
- 六 物理探査
- 七 平板載荷試験
- 八 載荷試験
- 九 くい打ち試験
- 十 引抜き試験

第2 地盤の許容応力度を定める方法は、次の表の(1)項、(2)項、(3)項に掲げる式によるものとする。(以下省略)

	長期に生ずる力に対する地盤の許容応力度を定める場合
(1)	$qa = \frac{1}{3} (i_c \alpha C N_c + i_r \beta \gamma_1 B N_r + i_q \gamma_2 D_r N_q)$
(2)	$qa = q_c + \frac{1}{3} N^* \gamma_2 D_r$
(3)	$qa = 30 + 0.5 N_{sw}$

4. 適用事例

4.1 戸建住宅の地耐力調査

(1) 既存資料確認・周辺状況確認

本調査地は、平地に位置しており、表層地質図からローム層主体の地盤であることが確認された。発注者から、古い造成地（造成10年以上経過）であると情報があつた。東西の隣接敷地も同時期に造成されており、高低差は無い。北側の宅地と本調査地との高低差は+200mm程確認された。

建物予定位置の4隅および中央部に5測点を設け、表面波探査を実施した。（図-7 参照）

調査員は、表面波探査の測定を行うとともに、周辺状況の確認を行った。

〈周辺状況の確認〉

- ・擁壁、土留、工作物等の状況確認
- ・周辺の既存家屋の確認
- ・地表面の不陸、土質、異物の有無の確認

⇒ 確認作業の結果、解析資料として保存

(2) データ解析・基礎考察

現場での計測、データ解析は、マニュアルに則って行う。データ解析の結果以下のような地盤状況が確認された（図-8 参照）。

得られたデータ解析結果と、周辺状況確認の結果を踏まえて、基礎考察を行う。

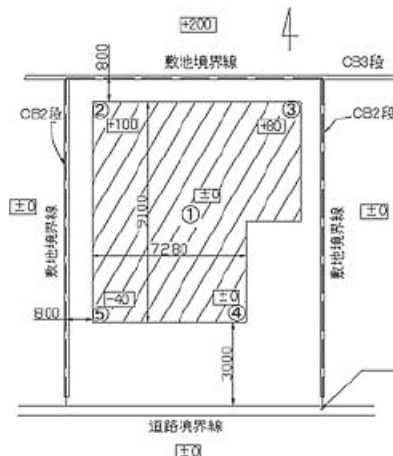


図-7 測点配置図

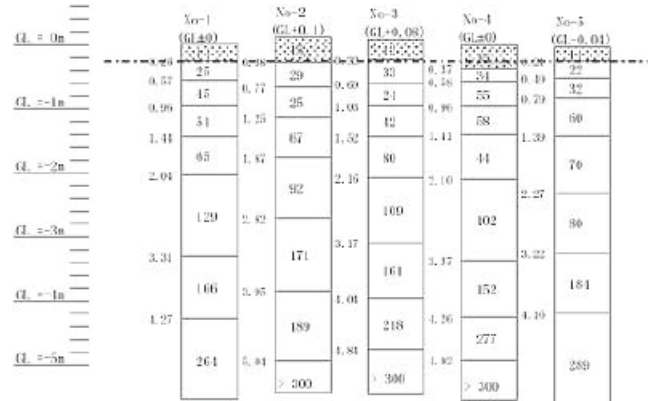


図-8 表面波探査解析結果（支持力断面図）

予定建物は、設計GLは現状GL(NO①)とされている。また、根切りが、GL-250（基礎砕石60mm）となっている（図-8の破線）。

予定されている建物が木造2階建であることから、接地圧を法規上規定されている“20kN/m²”と設定し、同時に、沈下量予測計算を行い、建築後の建物の傾きが、許容範囲内であるかどうかを確認した。

データ解析の結果、敷地の南側に位置するNO④は、現状GL面から深度約0.4mまで、支持力が20kN/m²を下回る結果となった（図-8のハッチの範囲）。また沈下量予測計算結果、最大0.8/1000程の傾きが予想された。これは許容範囲内であると判断した。

これらの結果から、基礎考察を「設計GL-390まで掘削し、掘削面を十分に転圧し、基礎砕石厚60mmから200mmに変更し、撒き出し厚を100mm以内とし、所定の機材を用いて十分に転圧する」とした。

4.2 標準貫入試験の補完調査

(1) 既存資料確認・周辺状況確認

調査地は丘陵地を造成しており、3棟の建物の築造が予定されている。既存資料では、建物予定位置3付近におい

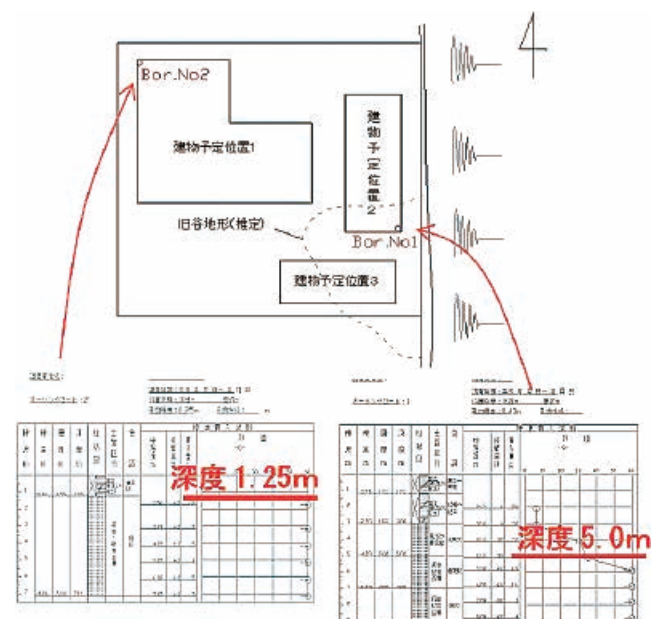


図-9 調査地概略図とボーリング試験データ

て、旧谷地形があったとされている。設計のために、2か所でボーリング試験が実施された（図-9参照）。

ボーリング試験の結果から、旧谷地形に位置すると考えられるNo1においては、泥岩・砂岩の伏在深度が深くなっていることが確認された。

ここで、建物予定地3において、旧谷地形の範囲を把握するために、表面波探査を実施した（図-10参照）。

ボーリング試験位置（No1）に1測点、建物予定位置に6測点、計7箇所の表面波探査測定を設けた。

(2) ボーリング試験との対比

同位置で行ったボーリング試験結果と表面波探査の結果を対比し、速度221m/sと306m/sの境界深度が、泥岩砂岩互層の伏在深度に相当すると判断した。この対比結果をもとに、表面波探査データを整理した（図-11参照）。

(3) 解析結果（岩盤の伏在深度）

ボーリング試験に加え、表面波探査を行うことで、岩盤の伏在深度をより詳細に把握することができた（図-12、図-13参照）。

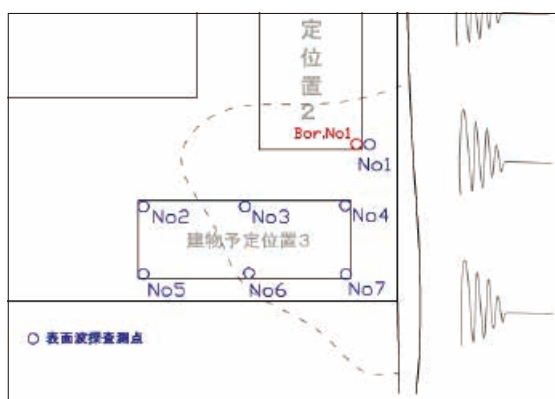


図-10 測点配置図

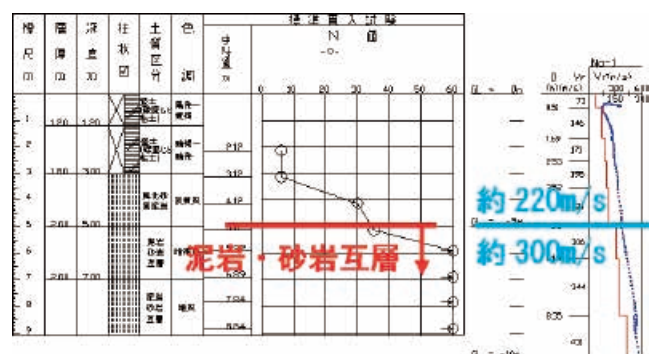


図-11 ボーリング柱状図と表面波探査結果の対比

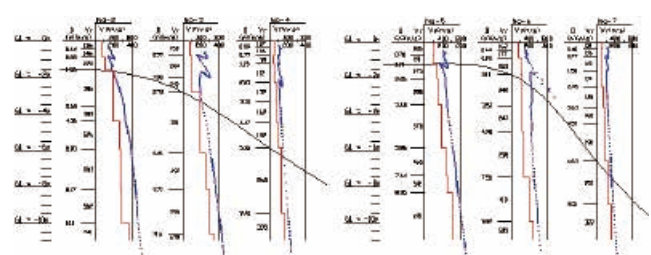


図-12 表面波探査結果（岩盤伏在深度推定ライン）

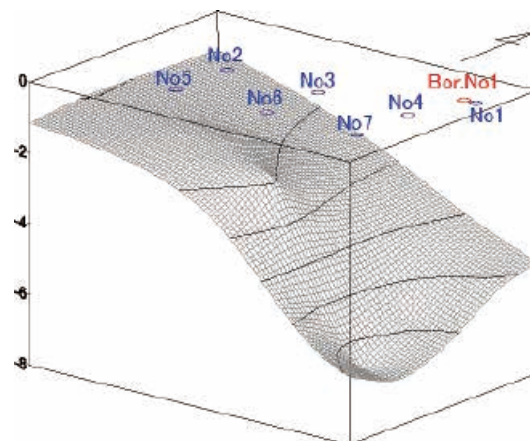


図-13 推定岩盤状況（立体図）

5. おわりに

昨今、戸建て住宅の設計者の意識が変わってきたように思える。おそらく、インターネットの普及等による、施主の意識の高さ、情報量が影響していると考ええる。このような変化が故に、少数派である“表面波探査による地盤調査”が採用されてきているのではないだろうか。

どのような調査方法にも通じることだが、機材を操作すれば、計測データが得られ、それをもとに基礎考察を行うこともできる。しかし、資料調査、周辺状況の確認、造成状況確認等の情報を伴わない基礎考察は、深刻な地盤リスクを含んでいる。機材などで得られた数値だけに頼らず、さまざまな情報を加味しながら総合的な地盤判断を行うことが、携わるエンジニアに求められている。

地盤調査や工事を生業とする我々にとって、仕事の本質とはなにか。施主が安心した生活を送ることが出来るように、しっかりと地盤リスクへの対処を提供していくことであると考える。

6. 参考文献

- 1) 土と基礎の振動
F.E.リチャード他著
- 2) 道路橋示方書・同解説
公益社団法人 日本道路協会
- 3) 建築基礎構造設計指針
一般社団法人 日本建築学会
- 4) 土質調査法
社団法人 土質工学会
- 5) 技術審査証明報告書「表面波探査法による地盤調査」
一般財団法人 先端建設技術センター