

表面波による簡易地盤探査法について

熊本大学工学部	正 員	秋吉 卓
八代高専	正 員	淵田 邦彦
熊本大学工学部	正 員	松本 英敏
熊本大学工学部	学生員	○井生 智明

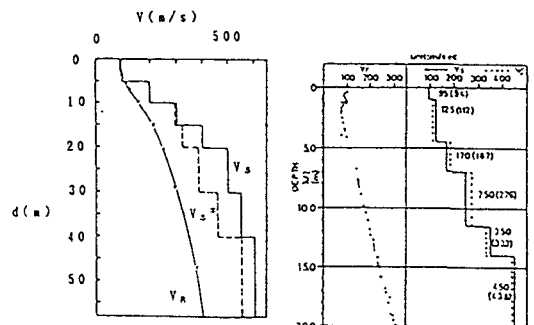
1. まえがき 構造物の大規模化や地下開発などに伴って地中の構造を簡便・迅速・安価に面的に調査できる非破壊探査法の開発が要請されている。その有力な方法として、実体波の屈折・反射現象を利用する弾性波探査法があるが、測線を長くとらねばならないことと、波形の読みとりには熟練を要する。一方、地表面を鉛直正弦加振するとき、主要成分として観測される表面波（レーレー波）の伝播性から、波長-位相速度の分散曲線を近似的に、深さ-S波速度分布と見なす簡便な方法が提案され¹⁾、国内でも実用化されている。²⁾ この場合の多くは、上述の実験曲線からS波速度(V_s)と層厚(H)を逆解析³⁾ないしは簡略な推定により⁴⁾、かなりの成果を得ているが、数種の加振器と制御装置を余分に要するので、経済的には若干問題はある。一方、本研究では、後者の表面波の性質を利用するものであるが、地表面の加振を重錘落下による衝撃荷重としているため、加振装置などの費用が不要で、簡便かつ安価な解析システムとなる⁵⁾⁻⁷⁾。これまでは、レーレー波の速度(V_R)-波長 λ の関係(分散曲線)を層構造(V_s -深さ D 関係)と相似としてきたが、今回はさらに、 V_s - H (層厚)の関係を簡便な解析手法により求めたので、ここに報告する。

2. 解析手法の概要 半無限弾性体の表面上のフーチング基礎から地盤内に入射した波は、P波・S波・レーレー波の組み合わせとなって伝播するが、振動源から十分離れた点の波動のエネルギーは、2/3がレーレー波によって伝達され、それだけレーレー波は実体波に較べて距離減衰が小さい。したがって、鉛直振動源からある程度離れた点で鉛直振動を測定したものは、ほとんどレーレー波を観測したことになる、これより層状地盤のレーレー波速度 V_R 、すなわち近似的にはS波速度 V_s がもとめられる。さらに野外実験の結果より、レーレー波の鉛直変位のエネルギー分布は一波長 λ の深さ以内に集中し、 V_s は平均的には深さ $D \approx \lambda/2$ の特性としうるといわれている。¹⁾ そこで、Haskellの方法⁸⁾によって、 V_s が単調に増加する7層地盤について、レーレー波の一次モードの位相速度 V_R を求め、 $V_R \approx V_s$ として、これを深さ $D \approx \lambda/2$ の位置にプロットしたものが図1a)中の実線である。さらに、同図中にはDixによる V_R から V_s^* を推定する簡略式⁴⁾

$$V_{sn}^* = \sqrt{[(V_R(n))^2 \times D(n) - V_R(n-1)^2 \times D(n-1)] / (D(n) - D(n-1))}$$

を用いて、 V_{sn}^* をプロットしている。ただし $D(n)$ は n 層の深さである。このDixによる V_s の簡略推定はそれほど良いとは言えないが概略は推定し得ている。一方、同図b)のように、実地盤でのPS検層と起振器表面波試験に対してはDix式による推定はかなりの精度を持つという報告例もある。⁴⁾

3. 実験結果および考察 図2は、衝撃荷重実験の概要を示すもので、測線上の一端に重錘(約50 Kgf)を落して衝撃波動を発生させ、測線上に約4 m離して設置した2台のピックアップP1およびP2での上下動波形をデジタルデータレコーダに収録した。図3の上2つの波形は、2 kHzでサンプリング



a) 理論 V_R からの推定例 b) 実験 V_R からの推定例

図1 V_R から V_s を推定した例

(従って時間ステップ $\Delta t = 0.0005 \text{ sec}$) した P1 および P2 で得られた同時記録である。このとき両波形のフーリエ変換形を、 C_k および D_k とすると $D_k / C_k = |D_k| / |C_k| \cdot \exp(-i\phi_k)$ となるので、振動数 f_k における位相差 ϕ_k が容易に求まる。そこで Richart¹⁾ に従って S 波速度 V_s とその深さ D との関係は、次式のように設定した。

$$V_s = V_R = L / t_0, \quad D = \lambda / 2 = V_P / 2 f$$

ただし、 V_P 、 λ ：レーレー波の伝播速度と波長、 L 、 $t_0 = \phi / 2\pi f$ ：2 台のピックアップ間の距離と波形到達時間差、 f ：振動数。さらに、この位相差 ϕ_k を示したのが、図 3 の下端の図である。当然振動数 f とともに位相差 ϕ が増大するので、レーレー波の位相速度 V_R と波長 λ は減少することになる。図 4 には、熊本大学構内の運動場で行った実験の見取図を示しているが、近くに 1 本だけボーリング資料点がある。現地は、阿蘇火砕流堆積物と砂礫とが互層をなし、10 m の深さに極めて軟弱な薄い粘土層が存在し、いわゆる挟み層を形成している。一般に水位が高く、数 10 m の深さまで N 値は大きくない特徴がある。

計測点近くのボーリング資料より、 V_s 分布に換算したものが図 5 の左図であり、右図は 3 つは計測地点 B における Dix 式による推定 V_s 分布である。各計測地点での挟み層の特徴をよく表現しているが、分布のばらつきがあるため、今後は、レーレー波速度 V_R の推定の精度を上げる工夫が必要となる。

参考文献

- 1) F. E. Richart 他: Vibration of Soil and Foundation, Prentice-Hall.
- 2) 佐藤長範: 起振器による地盤探査システム (Model-810), ビック株式会社
- 3) 例えば、田中・時松・桑山: 第 24 回土質工学研究発表会講演集, pp. 701-702, 1989. 6.
- 4) 高尾正, 小島正和, 今里武彦, 服部定育, 毎熊輝記: 第 8 回日本地震工学シンポジウム (1990) 論文集, Vol. 1, pp. 789-793, 1990
- 5) S. Nazarian and K. H. Stokoe II: 8WCEE, Vol. III, pp. 31-38, 1984.
- 6) J. S. Heisey, K. H. Stokoe II, and A. H. Meyer: Transportation Research Record 852, pp. 22-31, 1982.
- 7) 秋吉 卓・中村泰博・田中博徳: 昭和 63 年度土木学会西部支部研究発表会概要集, pp. 118-119, 1989. 3. 8)
- 8) 佐藤泰生: 弾性波動論, 岩波書店.

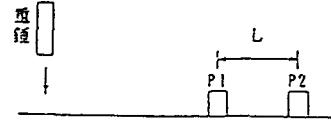


図 2 地表面衝撃実験の概要図

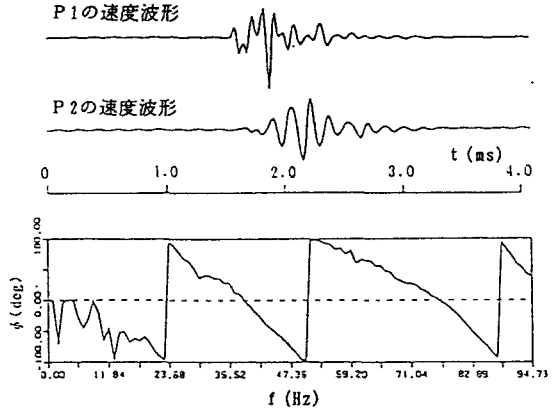


図 3 観測波形とその位相差

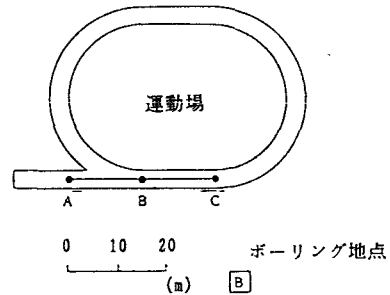


図 4 計測地点とボーリング地点の見取図

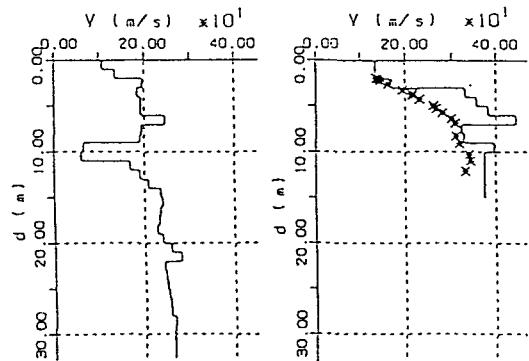


図 5 a) ボーリング資料による V_s b) 測点 C の V_s^f

図 5 ボーリング資料による V_s と推定 V_s^f