

## 表面波（レイリー波）探査の実例

小野 義徳

## 1. まえがき

従来、建築および土木の分野において浅部の地盤構造を把握することを目的として、最も一般的に採用されている調査方法として、ボーリング調査および弾性波探査が挙げられるであろう。ボーリング調査は、直接地質を確認・判断することができ、また原位置試験や試料採取（サンプリング）により土質・岩質の工学的諸性質を評価することが可能であるため、優れた調査方法といえよう。ただし、ボーリング調査は“点”の調査となるため、地層構造の水平方向の連続性を把握する場合には、調査の規模や重要性によってもことなるが、これらの構造を詳細に把握するためにはかなりの調査本数が必要であり、それに伴い調査費用や調査期間が多大なものとなる。

一方、弾性波探査は、水平方向の地質構造のつながりを把握するといった点では優れているため、トンネル、ダム、のり面等の地山の状況を把握するための土木工事の調査に採用されている。ただし、これらの弾性波探査として一般に利用さ

れている「屈折法」はボーリング調査に比較して精度が低いこと、雑音レベルの高い箇所では測定が困難であることや、中間の軟弱層を把握することが難しいなどの問題も抱えている。

近年、上記のような精度的あるいは計測的に制約を受ける屈折法にかわり、定常振動波を用いた調査方法が試みられてきている。屈折法はP波を用いた方法であり、精度的にもm単位あるいは100m/sec程度であったが、定常振動波探査ではS波に近い性質を持つレイリー波を採用することにより、探査深度は比較的浅部を主体とするが、その解析精度はcm単位あるいは10m/sec単位での測定が可能となっている。

## 2. レイリー波探査概要

## 2-1 探査原理

本機では、図2-1に示すような円形フーチング基礎に垂直運動を与えたときに発生する各種波動のうち、レイリー波の垂直成分を抽出して地層判定を行うものである。本図では実体波（P波、S

波)は起震源から半球形の波頭を形成して放射状に外側に伝播するが、レイリー波は円筒状となり外側へ伝播する性質を有し、その速度および粒子運動の軌跡は図2-2のように示される。

## 2-2 計測手順

計測は図2-3に示すように、起震機(E)、検出器(P<sub>1</sub>、P<sub>2</sub>)を直線的に配置した後、計測対象の深度および速度に応じて周波数を設定し、Eにより段階的に振動を与え、P<sub>1</sub>~P<sub>2</sub>間に伝播する速度を計測する。P<sub>1</sub>及びP<sub>2</sub>で受信した波形はオシロスコープに映しだされるとともに演算器によってP<sub>1</sub>~P<sub>2</sub>間の平均速度、測定深度を計算して表示するとともにプリンターにより記録される。

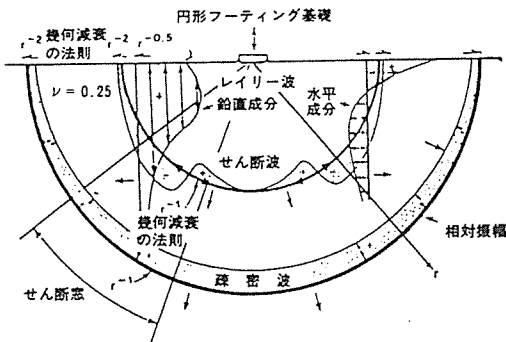


図2-1 等方均質半無限弾性体上の円形フーチングから発生する波動の変位分布 (Wood, 1968による)

これより、レイリー波は地表面付近のある深度内をV<sub>s</sub>(横波)にわずかに遅れて起震源より放射状に伝播することがわかる。

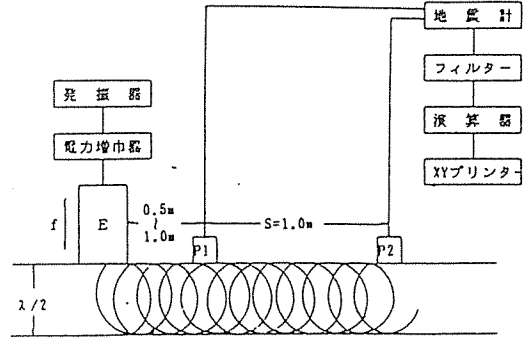


図2-3 計測様式

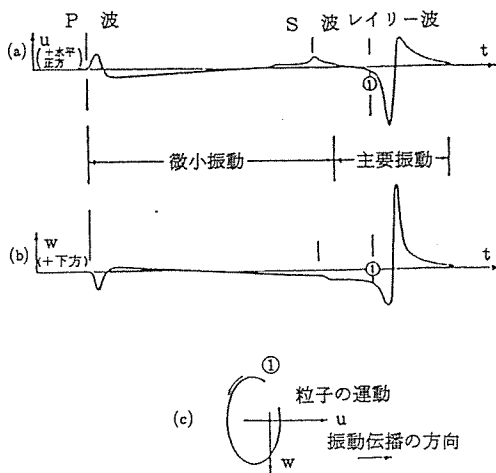


図2-2 表面の点源による理想半無限媒体表面の粒子運動の軌跡

## 2-3 解析方法

レイリー波探査の測定結果は図2-4に示すように縦軸に深度、横軸に平均速度を示したD-V<sub>R</sub>曲線として得られる。平均速度は、地表面よりある測定深度まで土質の平均的な速度であり、したがって、平均速度の変化点は、媒質の変化(土層境界)あるいは同一地層内の変化(空洞、緩み等)に対応すると考えられる。

さらにこれらの変化点により区分された部分の速度は区間速度 ( $V_r$ ) と呼ばれ、計算により算定される。

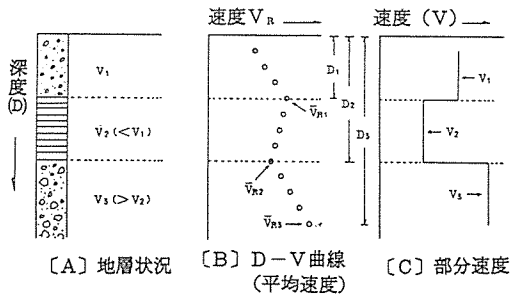


図 2-4 地盤模式図と速度柱状図

### 3. 探査事例

レイリー波探査の浅部の土质地質への適用性について検討を行う。

例として示す探査事例は、下水道管布設に伴う調査ボーリングで局部的に岩盤が確認されたため、この岩盤の分布範囲

を把握することを目的として実施したものである。

ボーリングによる調査結果では、当調査地域の土層構成状況は、全般的に粘性土層と砂質土層との互層からなっており、所々に腐植土層が分布するほか、局部的に凝灰岩層が分布している。粘性土層は全般的にN値は10以下、砂質土層においては20以下、凝灰岩層は強風化部分を除けば一律50以上を示している。

調査結果の一部を下図に示した。同図にはレイリー波平均速度、区間速度、ボーリング柱状図を示している。レイリー波平均速度の勾配あるいは点の集中部分は地層の境界や同一土層内の土質強度の相違に対応していることがわかる。特に深度3.30m付近および深度3.80m付近の曲線の変化はボーリング結果では粘

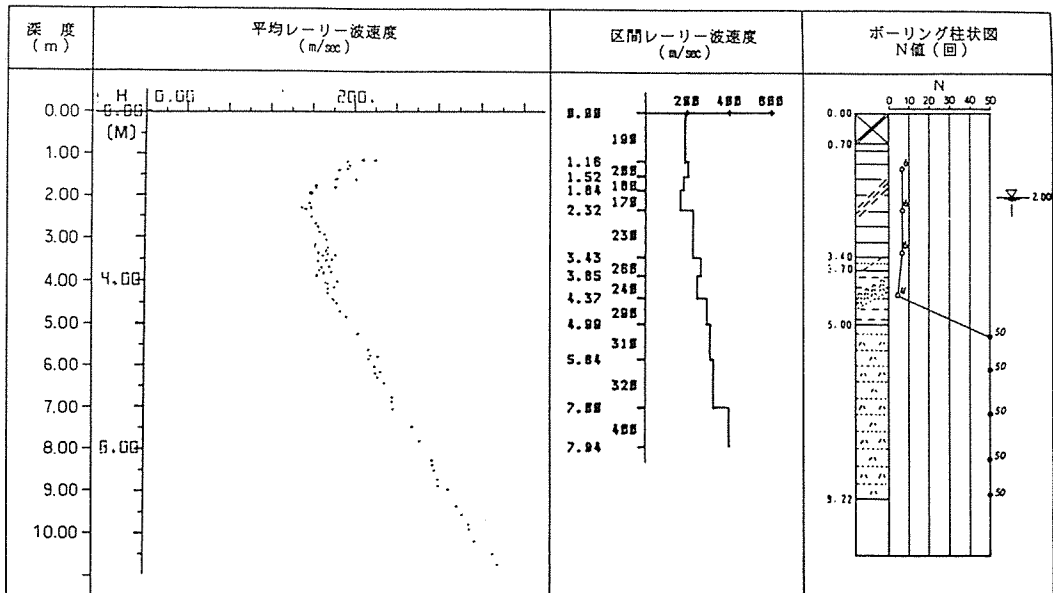


図 3-1 平均レイリー波速度・区間レイリー波速度及びボーリング結果との対比

性土層と砂礫層との境界部に対比される。

深度5.00m付近の速度の変化は粘性土層と凝灰岩層との境界部に対比される。

平均速度および区間速度とも層の変化点がボーリング結果に比較して多少のずれがみられるが、これは測定区間の相違すなわちボーリングの点の調査に対し、レイリー波探査が線の調査であるため、多少の差が生じたものと想定される。

以上のように、レイリー波（平均および区間）速度の変化などは、土質境界あるいは同一土層内の強度的相違と対比されることから、ボーリング結果との比較対比により土層構成・土質強度を推定するのに有効な方法であることを示している。

各地点のボーリング結果と区間レイリー波探査結果から、各土質ごとに比較対比すると、表3-1のとおりである。

表3-1 ボーリング結果と区間レイリー波探査結果との比較

土質名	N 値 (回)	区間レイリー波速度 (m/sec)
粘性土層	2~11	80 ~ 240
砂質土層	3~23	80 ~ 290
腐植土層	4~11	90 ~ 125
凝灰岩	(4)~50	300 ~ 610

上表の結果から、区間速度が大略300 m/sec以上を示す箇所は凝灰岩層と判断される。

なお、粘性土層・砂質土層および腐植土層については、速度が重複するため、区間速度からのみ土層を判定することは困難であり、前後のボーリング地点の平均速度および区間速度状況を考慮して、土層の判断を実施する。

#### 4. N値と区間レイリー波速度との相関

ボーリングによる標準貫入試験結果（N値）と区間レイリー波速度との相関性をみると、下図の通りであり、相関係数  $r = 0.76112$  であり、相関性があ

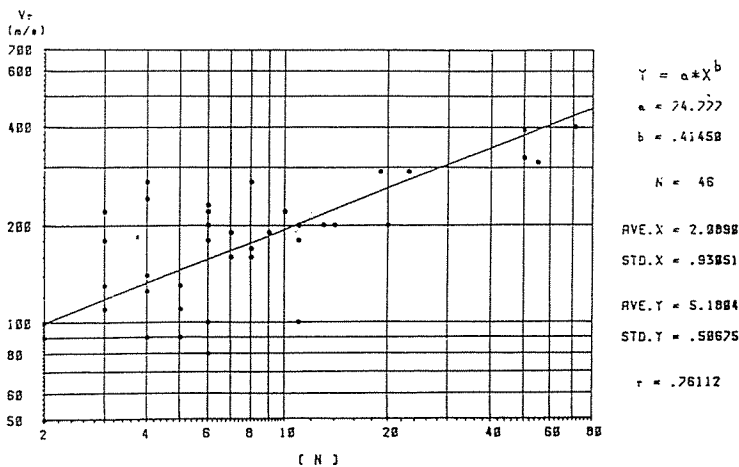


図4-1 N値と区間レイリー波速度の相関図

ると考えられる。

$$r = 0.76112 > r_{(44, 0.01)} = \frac{2.576}{\sqrt{\phi + 3}} = 0.376 \dots \text{高度に有意}$$

$$(\phi = N - 2)$$

この結果から、N値の換算式を求めると、

$$N = 10 \left( \frac{\log V_r - 1.874}{0.415} \right)$$

## 5. 今後の問題

これまでの探査結果の集積から、実例として示したような媒質（土質）が極端に異なるような土層構造や土質強度（N値など）の変化が大きい場合には、レイリー波速度（平均速度および区間速度）にも比較的变化が大きくあらわれるようであり、また、土層区分やN値の推定などでも充分その対応性がみられる。

ただし、土質が比較的近似したもので尚且つ土質強度も近似した土層の場合では、レイリー波による探査にでも変化に乏しく、対応性を見いだすことは困難である。

また、N値の換算式についても、条件によってはデータのバラツキが多く、相関が見いだせない場合もある。

したがって、今後はこういった土層構造や換算式に関する改善策をハード面およびソフト面において勘案し、より精度の向上に努めたい。

㈱親和調査設計事務所

