

不均質性地盤における波動伝播速度の測定

京都大学防災研 正員 柴田 徹
 京都大学防災研 正員 土岐 竜三
 清水建設 K.K. 正員 山本 誠一

1. まえがき

土の弾性波速度に関する従来の室内実験結果^{1), 2)}によれば、波動の伝播速度あるいは土の弾性定数は有効応力の影響を受けるとされている。この考えを実地盤に適用すれば地表面からの深さとともに波動の伝播速度が連続的に変化する、すなわち地盤が不均質性をもつことになるが、深さと弾性波速度との連続的な関係を直接測定表示することは困難である。そこで、ここでは地表面上で得た横波に関する走時関係から伝播速度と深さとの関係を求める方法について検討し、その結果を実地盤に対して適用したものである。

2. 不均質性地盤の走時曲線と最大到達深さ

地盤中の深さ方向への速度分布が任意である場合の波動伝播を一般的に厳密に論じることは困難であるが、波長を長さの尺度としたとき弾性波速度の距離による変化率が小さい場合には、これを近似的な取り扱いをすることが可能となる。通常の地盤では、伝播速度が急変するような境界面の近傍を除いてはこのような条件が満足されるが、この場合の波動の伝播経路を表わす ray path は次式によって支配される。

$$\frac{\sin \theta}{c(z)} = \frac{\sin \theta_0}{C_0} = p = \text{constant} \quad (1)$$

上式中の C_0 は波動源における伝播速度、 $c(z)$ は地盤中の任意の深さ z における伝播速度、 θ_0 は波動源での入射角、 θ は深さ z での波動の進行方向を表わす角である。

波動源で発生した波は上式に従って伝播することになるが、その波動が再び地表面に現われるに要する時間 T とその地点までの距離 X とは次式で与えられる。

$$T = \int_0^Z \frac{2}{c(z)[1-p^2c^2(z)]^{1/2}} dz, \quad X = \int_0^Z \frac{2pc(z)}{[1-p^2c^2(z)]^{1/2}} dz \quad (2)$$

ここに、 Z は最大到達深さである。この Z は波動源での入射角に対応して異なった値となる。いま、図-1-a) に示すような走時曲線が得られたものとする。図中において、 $X=X_1$ に到達した波動は図-1-b) 中に示したような弧を経て伝播するか、その時の最大到達深さ Z_1 は次式で与えられる。

$$Z_1 = \frac{1}{\pi} \int_0^{X_1} \cosh^{-1}(C/C_p) dx \quad (3)$$

上式中の C_1 , C_p の値は走時曲線の勾配から求まる値

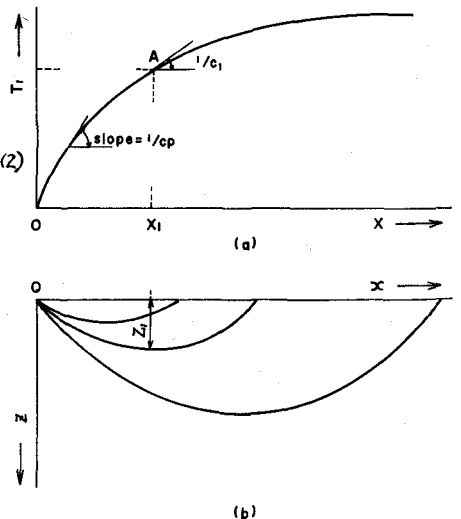


図-1 a) 走時曲線と b) 伝播経路

であり、 X に関して連続関数で表示することはできないので、 Z_1 は逐次数値積分で求めねばならない。すなわち、地表面上での走時曲線が得られた場合に、深さと伝播速度との連続な関係を見い出すには、i) X_1 に対応する走時曲線上の点における接線の傾斜の逆数として C_1 を求め、ii) 式(3)により対応する Z_1 を求める。以下水平到達距離 X_1 を変化させて同様の操作を繰り返すことにより目的を達することができる。

3. 砂地盤での実測例

上述の考えによれば、地表面で得られる走時曲線から地盤の深さ方向の不均質性を知ることができるが、これを実地盤に適用するため数ヶ所で現地測定を実施した。砂地盤で得られた走時曲線の一例が図-2である。図中の○印は板たたき法によって得た波の走時関係をプロットしたものである。これらの測定値を実線で示した曲線で近似し、2.に述べた方法により深さと速度との関係を求めたのが図-3の○印である。それらのプロットに併記した数字は最大水平到達距離である。

たとえば、図中に33と記した値に対応する波は深さ約10mにまで達した後、波動源から33m離れた地点で地表面に到達することを表わしており、深さ10m地点での速度は約180 m/sec程度であることがわかる。

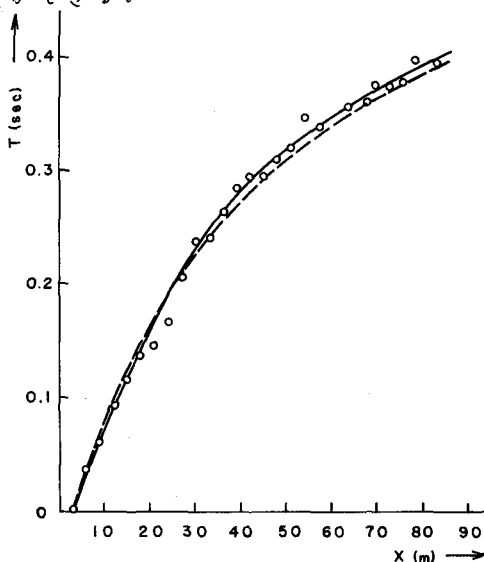


図-2 砂地盤での走時曲線の例

図-3中の実線は通常の屈折波法により求めた結果であるが、この場合は均質な地盤の層状構造として判断されることになる。伝播速度と深さとが線型比例の関係にある場合には、式(2)、(3)を解析的に評価することが可能になり、この場合の伝播経路は円弧の一部になる。深さと伝播速度とが図-3の破線のような直線関係にあるとして、逆に走時曲線を解析的に求めたのが図-2の破線であり、いずれもよい一致を示していることがわかる。

4. 結び

二つの相接する媒体での伝播速度が著しく異なる場合には、走時曲線にも明確な屈曲点が見われて、それらの平均的な伝播速度を知るには屈折波法が有力であるが、通常の地盤の地表面に近い部分では波動の速度が一つの境界面で急変するよりは徐々に変化の方が実情に近いと考えられ、このような場合には上述のような手法により、地盤の深さと伝播速度との関係をかなり精確に知ることができよう。

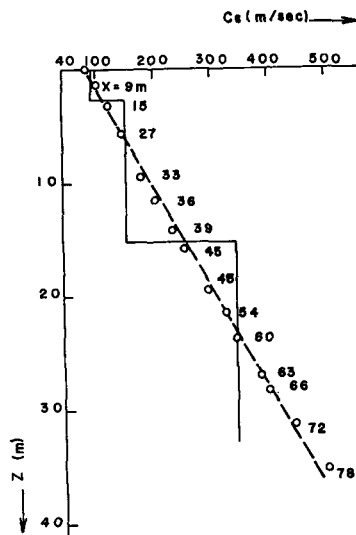


図-3 横波速度と深さ

1) Hardin and Richart; ASCE, SM1, 1963.

2) 柴田・土岐・寺田; 京防災研年報, 13号, 昭.45.