

「弾性波による地下探査」その結果

生産技術研究室 和田 利 雄

～30mの土木用地質構造探査である。

1. はじめに

「弾性波」近頃よく耳にする言葉である、では、いったいそれはどの様なものだろうか……………。

我々は、これまでにダム、宅造、敷造、道路、その他にも、空港、原子力発電所など様々な工事を手がけて来た。

我々にとって「土質、岩質に適した施工法」は、常に考えなければならない事柄である。実際に目で見ることのできる現象については判定し、対策を講ずることも可能である。

しかし、実際に見ることのできない地下の構造や状態は未知数であり、これらを解き明かすことは、必要不可欠な作業である。にもかかわらず、長年の経験や勘によって、極めて大胆に推察されることが多い。

地下の岩盤構造を科学的に解明することによって、適切な施工法や機械の選定を行うことが出来るし、計画通りの成果を期待できることになる。

我社では、その未知数を解き明かす、一つの方法として、弾性波による地下探査、弾性波速度による岩盤の掘削性の判定を行なっている。

2. 弾性波とは

2-1 概要

振動が媒体の弾性的性質によって伝達する波を総称して、弾性波という。

地層内を伝わる弾性波の実体波（波の種類）には、縦波（P波）と横波（S波）の2種類がある。縦波は疎密波で、容積の変化が波として伝わり、媒質の粒子が波の進む方向に振動する波である。横波は、ねじれた状態の変化が波として伝わり、媒質の粒子が波の進む方向に垂直な面で振動する波である。

なお、この他にも地表面近くを伝わる表面波があり、これをラブ波（L波）と言う。

P波が最も速く、媒質によって違うが、だいたいS波の1.7倍程度の速度である。

2-2 弾性波法の種類

弾性波法には、反射法と屈折法がある。

○反射法

反射波の到着時間に着目し、解析を行うもので、その主流は探査目標深度が数kmの石油探査である。

○屈折法

屈折法は、主として初動の到着時間のみを問題にする。屈折法では探査目標深度の約10倍の測線長を設ける必要があるから測線長が大きいと振動エネルギーとして、大量の爆薬を爆発させねばならない。

実際われわれが必要とする地下構造の探査として、屈折法が最も頻繁に用いられているのは、探査目標深度が数mないし20

3. 弾性波速度と掘削性

施工上必要な岩盤、あるいは岩石の巨視的な状態を知る一方法として、弾性波速度を用いることが多い。

弾性波速度は、岩のクラック、風化の程度、ゆるみ、方向性、含水状態、層の厚さなどに影響される

一般的に言って弾性波速度が大きいほど硬岩であるが、岩の種類によって、その基準値は異なる。同種の岩であれば、弾性波速度の大きいほど岩は硬く、小さくなるに従って、風化、亀裂の度合が増していると見るべきであろう。

弾性波速度は、ブルドーザのリッパピリティーの判定にしばしば用いられている。

図1にD8、D9、D10の弾性波速度に対するリッパ能力を示す。

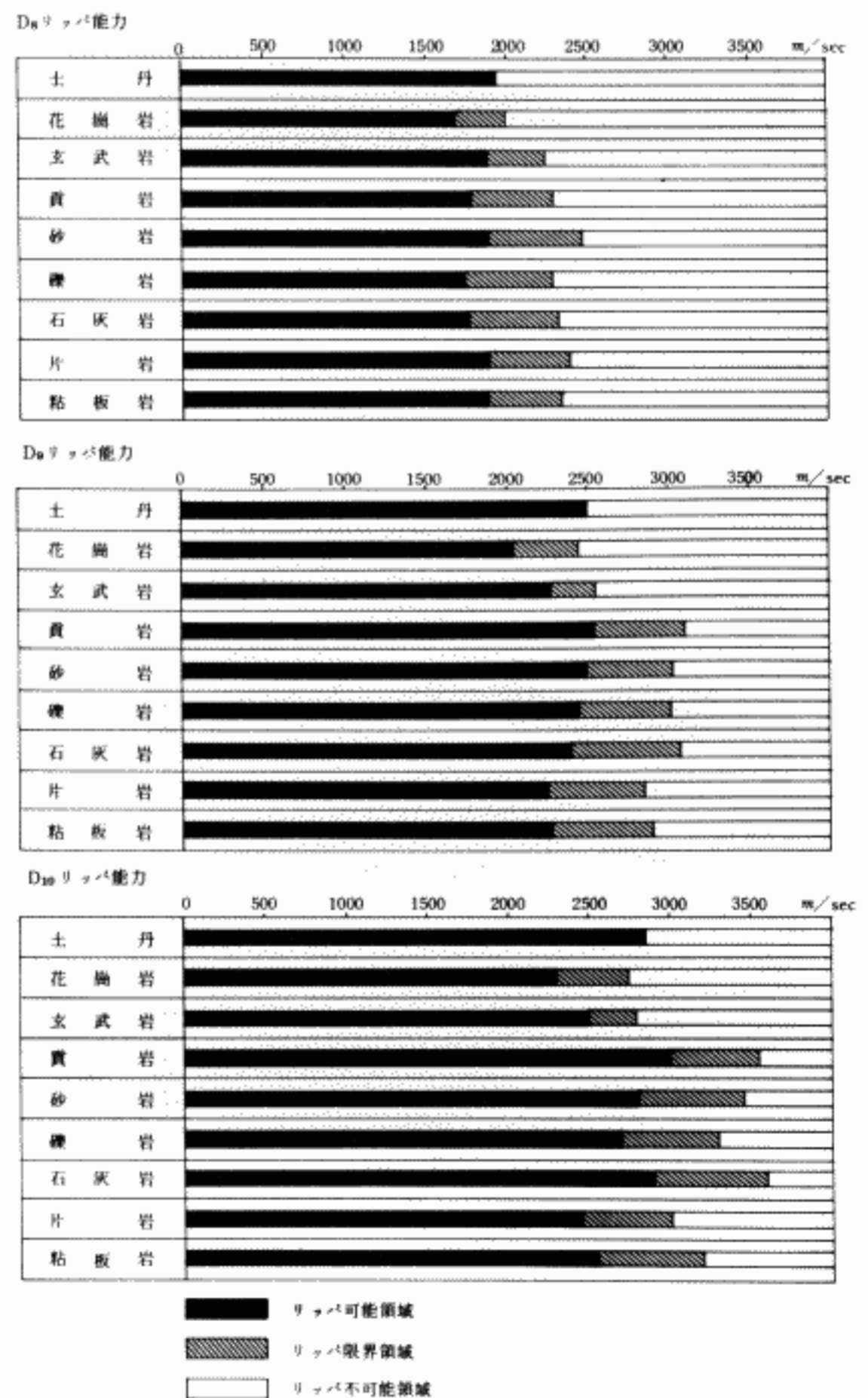


図-1

このグラフは、岩質ごとにリップの可能領域、限界領域、不可能領域の三つに区分されている。グラフの上の数字が、弾性波速度を表す。

現場の岩質と、弾性波速度を知ることによって、掘削性の判定が、可能になるわけである。

例えば、弾性波速度が2,000 m/secである砂岩の山を掘削する場合には、その岩が、D8のリップ限界領域にあるので、まずD8では、掘削不可能と判断してもよい。

しかし、クラックの有無や方向性などから、僅かずつでも、掘削可能なこともあるが、その場合は、経済性を考慮しなければならぬ。より多くデータを集め、より確かな判定を行えるようにしなければならない。

4. 弾性波測定

測定に必要な用語と、測定機を簡単に説明しておく。

4-1-1 用語の説明

○走時

一般に弾性波が振源から観測点にとどく時間を、走時という。

○走時曲線

横軸に、発振点と観測点との距離をとり、縦軸に走時をとって、距離と時間を表したグラフを走時曲線という。

4-1-2 機材の説明

○測定機 (MC SEIS1300 MODEL 1191)

写真-1



この機械の特長は、シグナルエンハンスメント（信号加算方式）という機能を備えていることである。

本機は、受振器で受けた振動を信号として記憶することができ、かつ何回も同じ信号を重ねることが可能である。つまり、ハンマーによる打撃では、エネルギーが小さく、振動も弱くなる為、記録紙に書かれた波形を見た時に、ノイズと初動の区別がつけにくい。(ノイズ＝暗騒音：重機などによって発生する)

そういう時に何回も打撃を重ね、信号を加算することによって、周波数、振巾に周期性のある弾性波の信号は増幅される。

しかし、周期性の無いノイズ成分は、相殺されるので、初動の位置がはっきりする。

○受振器 (ピックアップ) 写真-2

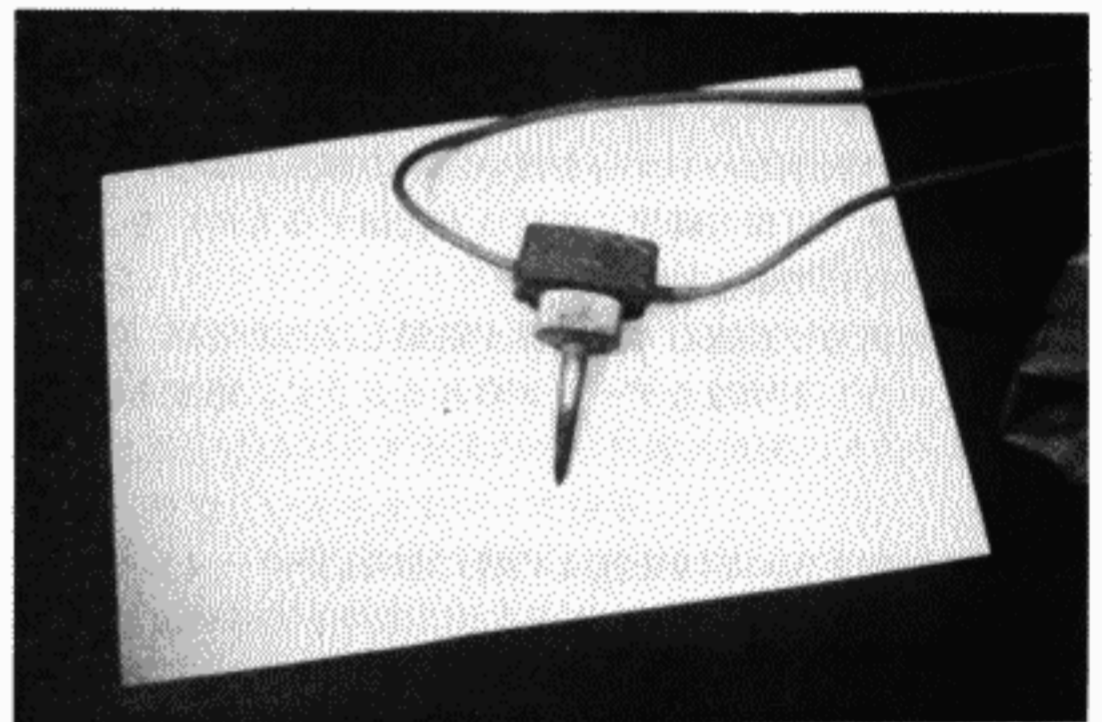


これは、写真の突出した部分で振動を拾って、それを信号として測定機へ送る働きをする。

通常は、ピックアップの突出部分だけを、地中にさして使用するが、測定中に風が強く、ノイズが入る場合は、全体を地中に埋め込んで使用する。

また露頭した岩盤上で測定する場合などは、ピックアップを粘土で岩盤に貼り付けて使用することも可能である。

○ハンマリングスイッチ (写真-3)



ハンマーの柄の部分にテープでとめる。

打撃の瞬間に記録紙の刻時線0と打撃時刻とを一致させる働きをする。ハンマリングスイッチを使用した場合は、記録紙の刻時線0を起震時刻として、データを読むことが出来る。(図-5参照)

4-2-1 測定方法

普通受振器間隔は1～5 mとし、1展開の長さを20～25 mとするが、測線長が長い場合には図2のように、端の受振器を重複させながら展開を移動させる。

図2の様な場合、目標探査深度を10～15 mとして、図3の様な走時曲線が得られるように起震点（ショットポイント）を決める。

人力によるハンマー起震では、通常最大受振距離は30～50 mであるが、地表状況によって著しく異なる。

一般に地表が固い場合には地震波の減衰が小さく、遠方までの記録が得られるが、逆の場合には、わずかに10数 mしか良い記録がとれない場合もある。

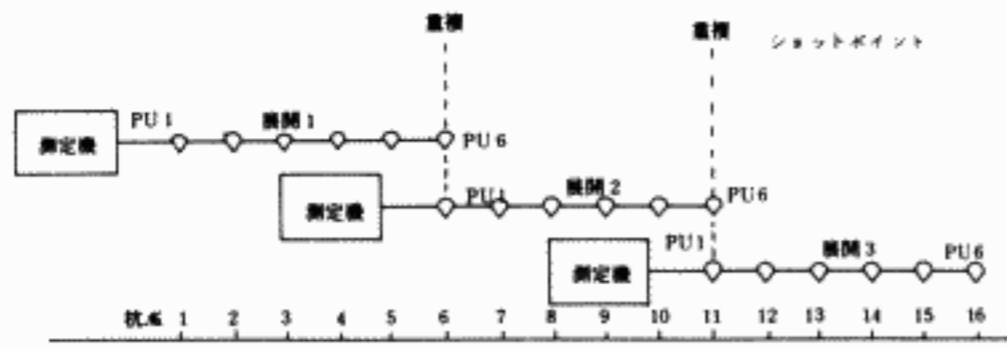


図-2

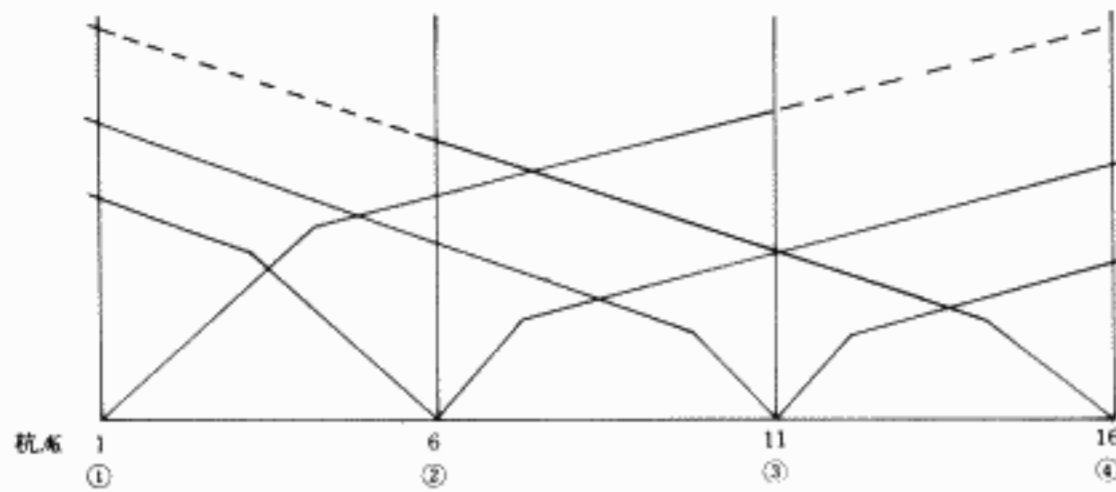


図-3

4-2-2 測定手順

- ①起震点は芝生や軟らかい粘土、砂等の場所をさけ、固い場所を選ぶ。
- ②受振器を10~20cm地中に埋込む。
- ③起震点に鉄板(φ20cm、厚さ2~3cm)を置き、その上を打撃する。(岩盤が露頭している場合には、その上を直接打撃してもよい)
- ④できるだけ大きなハンマーを使い、柄の部分にはハンマリングスイッチ(打撃の瞬間に時間0を記録するもの)を、テープで取り付けておく。
- ⑤最初に地震波が到達して受振器が振動しはじめる点(これを初動という)が明瞭なデータが取れるように、感度を調節する。

上記の手順を図に示すと図4の様になる。

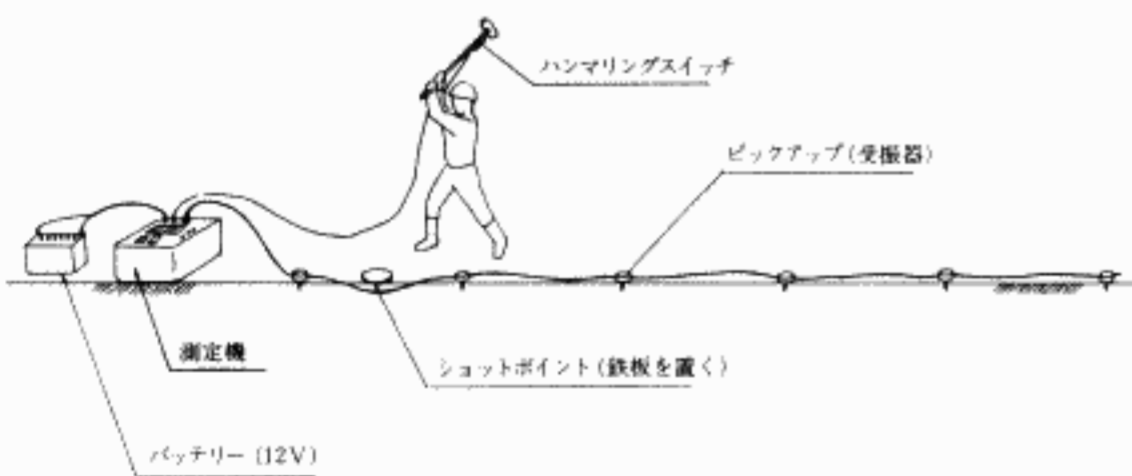


図-4

4-3 データの読み取り

記録紙の上下端に 1/100sec ごとのタイミングマークが刻時される。普通図5のように初動の位置がはっきりしている場合には、初動の位置にマークし、各受振器の初動を0線を基準にして読み取り、データシートに記入する。

ここまですが弾性波の測定から解析までの一連の作業で、一番手間がかかり、面倒な仕事になる。

測定法が不適當であったり、又はデータの読み取り誤差が大きかったりすると、弾性波速度が大幅に違ってくることになる。

例えば、岩盤の強度が機械の破碎能力を、はるかに越えているのに弾性波速度がそれに見合ったものでないなど。

このような場合、データの読み取り誤差によるものが、ほとんどで、また一からデータの読み直しと言うことになる。

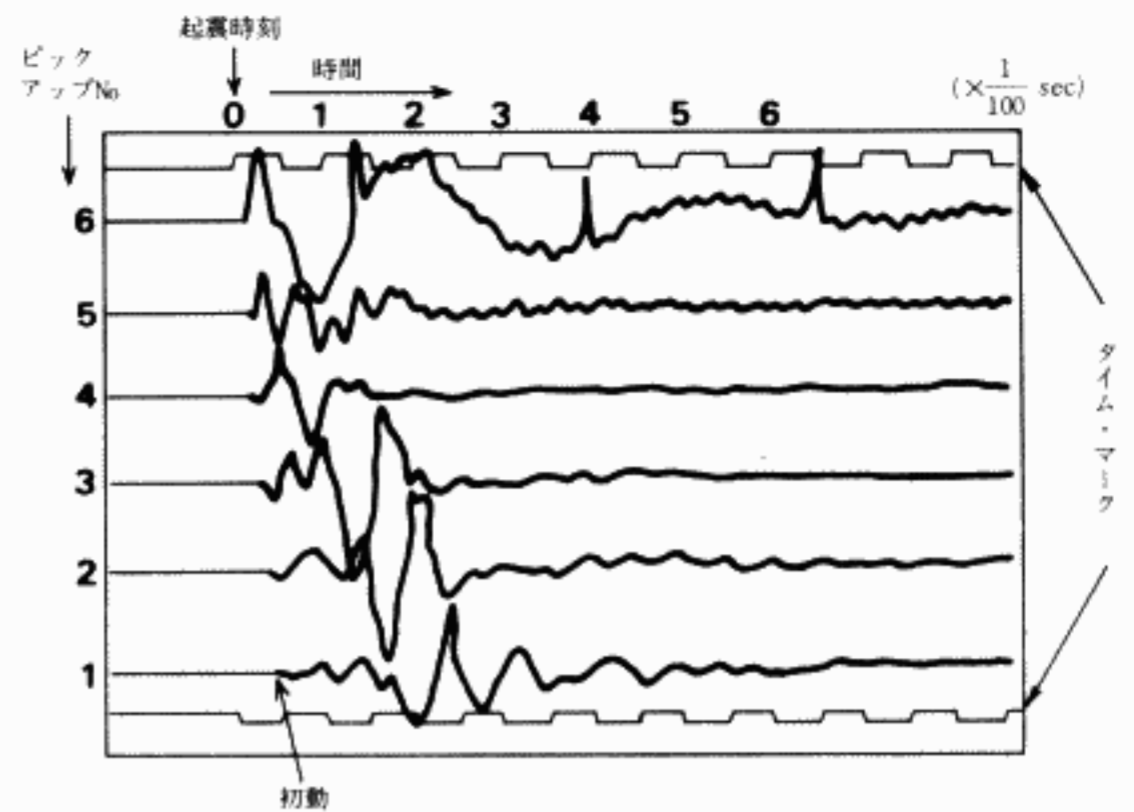


図-5

5. 弾性波の解析

我々の行なっている弾性波法は屈折法で、主として初動の到着時間のみを、問題にする。

つまり、起震点からの振動が、地下を通り受振点に到着するまでの時間と、距離から速度を求め、それを秒速で表わしたものを、弾性波速度と言う。

○測定したその場で、大まかな値を知りたい場合は…

- (1)記録されたデータの初動の位置を線で結ぶ。(図6点線)
- (2)次に、その線の折れた点に印をつける。
- (3)到着時間の速い方(ピックアップNo6)から、折れ曲る点までの傾きから、第一層の弾性波速(V_1)を求めることができる。
- (4)また折れ曲った点から以後の傾きから、第二層(この時、深度は解らない)の弾性波速度(V_2)を求めることができる。(図6参照)

この方法は、非常に手軽で簡単であるが、誤差が大きく、本当に大まかな値としてしか、見る事が出来ない。

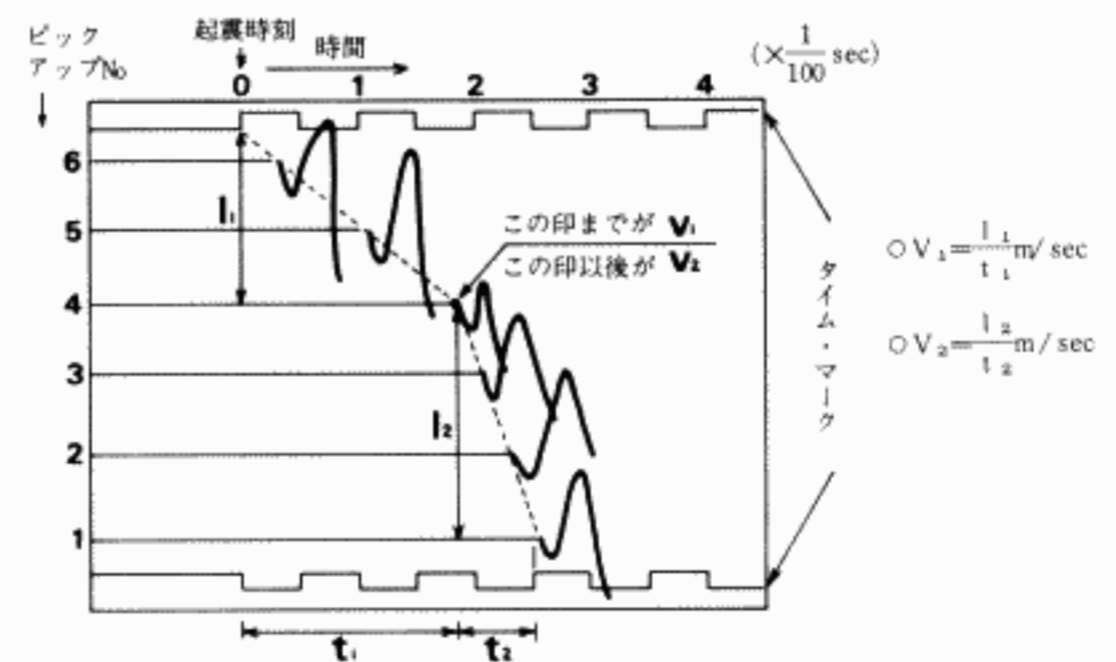


図-6

5-1 数値解析

“はぎとり法”の特長

屈折波は、その経過全体の積分結果しか伝えてくれないので、途中のこまかい現象は隠されやすい。ゆえに、全般的におおま

かな取り扱いに適している。

その反面、微細構造の検出には不向きなので、それには独特の工夫または別の測定法が要求される。

このように屈折波がおおまかな取り扱いに適している点を遺憾なく利用し、平行構造、傾斜構造はもちろん、境界面の傾きが一様でない場合にも適用できるのが、萩原の“はぎとり法”である。

解析を最も速く、正確に行う方法として、コンピュータによる数値解析法がある。

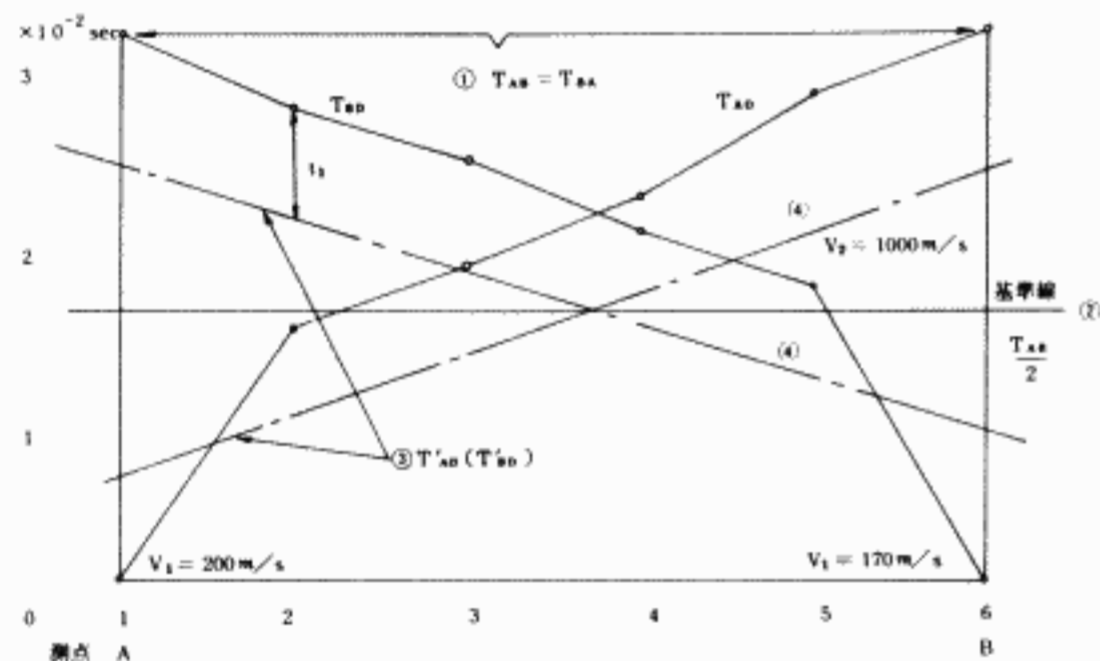
これは、“はぎとり法”の計算式をプログラミングし、それに測定から得たデータをインプットしてコンピュータ内で計算処理を済ませ、その答えをアウトプットさせるという方法である。

勿論、走時曲線から地下深度まで、全てコンピュータが描いてくれる。

この方法だと、決められた公式と手続きどおりに解析が行なわれるので、人間による誤差が無い。無論、データの読み取りが正しければの話である。

5-2 図式計算による解析

測定が終わってから、全てのデータを前述の方法で読み取り、図7の方法により解析する。



時間分割

| | | | | | | |
|-----|-------|------|------|------|------|------------------------------|
| (5) | t_1 | 0.65 | 0.65 | 0.55 | 0.55 | $\times 10^{-2} \text{ sec}$ |
|-----|-------|------|------|------|------|------------------------------|

(6)
$$H_D = t_1 \times V_1 \times \frac{1}{\cos \theta_1} \left(\sin \theta_1 = \frac{V_1}{V_2} \right)$$

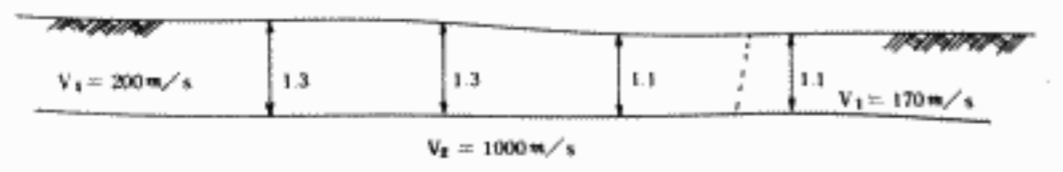


図-7

1. $T_{AB} = T'_{AB}$ (往復の一致) を確認。
2. $T_{AB}/2$ の値をとり基準線を引く。
3. 各測点において $T_{AD} - T_{BD}/2$ をとり、基準線上下に T'_{AD} (又は T'_{BD}) 点をとる。
4. T'_{AD} の各点を第2速度値 V_2 に重点をおいて最小2乗法的に直線を引く。測線2、及び5上 T'_{AD} 点は第一速度値と第2速度値のみかけの値である。

5. 各点の $T_{AD} - T'_{AD}$ (又は、 $T_{BD} - T'_{BD}$) を t_1 とおき時間分割線より下方にとる。
6. 各受振器点の深度 H_D を求め時間分割基準線に記入する。
7. 各深度 H_D をコンパスで地形断面図にとり、包絡線を結んで速度層断面図を作成する。但し、第1速度値 V_1 は起震点附近の立ち上がり勾配から第2速度値 V_2 は T'_{AD} (又は T'_{BD}) より求める。

この方法で最も注意すべき事は、図式による方法なのでグラフの数値の読み取り、あるいは線を一本引くにも視覚による誤差が大きく影響してくるので、気をつけなければならない。

6. 弾性波測定の実施例

今年の初め、我が社が施工している高速道路の現場よりD10を使用しての施工(単独での掘削)が、可能であるか、否かを判定する為に弾性波を測定してほしいとの依頼を受け、早速、測定を行うことになった。

この測定に於いては、掘削エリア内の弾性波を測定し、実際にD10を用いて掘削を行い、その作業量から施工性の良否を判定するというものである。

○弾性波の測定

| | |
|----------|-------|
| ピックアップ間隔 | 3 m |
| 展開数 | 4 展開 |
| 測線長 | 45 m |
| 起震 | 大ハンマー |

○測定結果

測定により得たデータが図8である。
SPは起震点(ショットポイント)を表わし、DEVは展開を表わす。

***** DATA OF SEISMIC WAVE *****

(X0.01sec)
1 SPAN 3m

| | | | | |
|----------|----------|----------|----------|----------|
| SP1.DEU1 | SP2.DEU1 | SP3.DEU1 | SP4.DEU1 | SP5.DEU1 |
| 0.850 | 1.000 | 1.600 | 2.550 | 9.000 |
| 0.850 | 0.850 | 1.400 | 2.450 | * |
| 0.300 | 0.700 | 1.350 | 2.350 | * |
| 0.550 | 0.600 | 1.200 | 2.300 | * |
| 0.750 | 0.350 | 1.850 | 2.100 | * |
| 0.900 | 0.100 | 0.800 | 1.950 | * |
| SP1.DEU2 | SP2.DEU2 | SP3.DEU2 | SP4.DEU2 | SP5.DEU2 |
| 0.900 | 0.100 | 0.800 | 1.850 | * |
| 1.000 | 9.000 | 0.700 | 1.650 | * |
| 1.050 | * | 0.200 | 0.550 | * |
| 1.150 | * | 0.350 | 0.400 | * |
| 1.300 | * | 0.550 | 0.250 | * |
| 1.450 | * | 0.600 | 0.100 | 1.100 |
| SP1.DEU3 | SP2.DEU3 | SP3.DEU3 | SP4.DEU3 | SP5.DEU3 |
| 1.450 | 0.600 | 0.100 | 1.100 | * |
| 1.700 | 0.850 | 9.000 | 0.100 | 1.800 |
| 1.900 | 1.000 | * | 0.350 | 0.950 |
| 2.000 | 1.200 | * | 0.500 | 0.750 |
| 2.200 | 1.250 | * | 0.650 | 0.450 |
| 2.500 | 1.650 | * | 0.900 | 0.250 |
| SP1.DEU4 | SP2.DEU4 | SP3.DEU4 | SP4.DEU4 | SP5.DEU4 |
| 2.500 | 0.900 | 0.900 | 0.250 | * |
| 9.000 | 9.000 | 9.000 | 9.000 | * |
| * | * | * | * | * |
| * | * | * | * | * |
| * | * | * | * | * |

図-8

図8のデータをコンピュータに入れ解析した結果、弾性波速度は次の通りである。

- 第1速度層 $V_1 = 700 \sim 1200 \text{ m/sec}$ で深度は約2 mまで
- 第2速度層 $V_2 = 2000 \sim 2200 \text{ m/sec}$ で深度2 m以上

この解析結果を、コンピュータよりアウトプットしたものが図9である。

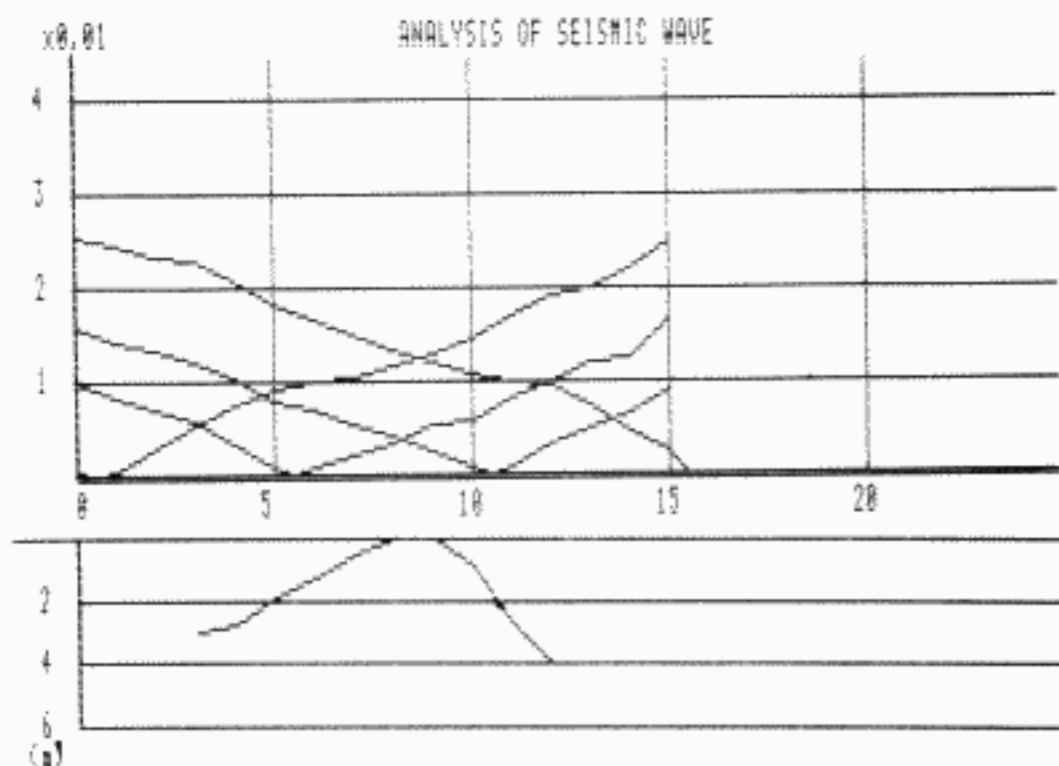


図-9

以上の結果より、この掘削エリア内の弾性波速度は、CAT・パフォーマンスブックのD10によるリッピング可能領域に充分属しており、単独掘削可能と判定した。

又、この判定を裏付ける為に、作業量を実測してみたが、結果は良好であった。

○注意

現場で弾性波速度を判定する場合、測線は直線上に設け、地盤の起伏が少ない場所でなければならない。

また発破などにより、岩盤が弛んだ状態では、新鮮な状態での弾性波速度は得にくく、地下の発破の影響を受けていない部分の速度を測定できるにしても、打撃エネルギーの不足や測線長を長くとれないなどの問題がある。

測定機は、微小な振動でも、その影響を受けやすいので、測定中は、機械は勿論、受振器の周りを人が歩くことさえ許されない。

7. おわりに

以上 弾性波の測定法並びに、解析法、測定例と述べてきたが、いかに便利な機械ができようとも、全ての仕事を機械に押しつける訳にはいかない。

あらゆる現場を踏んで、より多くのデータを集め、測定方法も現場の状況に合わせて応用をきかせられるようにしなければならない。

そして、施工法の検討や新工法の開発に大いに利用すべきだと思う。

以上

環境問題を解決する新しい岩盤掘削工法(予備発破工法)のパンフレットができました。

静かな開発

環境問題を解決する新しい岩盤掘削
予備発破+CAT D10ブルドーザ

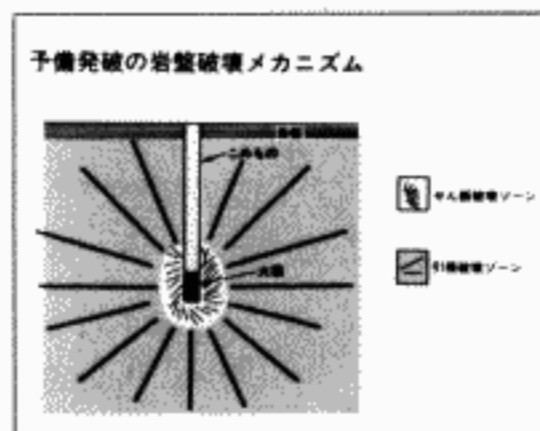


硬岩処理工法の中で発破工法は生産性の高い工法ですが、原子力発電所の造成工事、あるいは作業個所の近くに住宅等がある場合には、振動、騒音の制約を受け、通常の発破工法を用いることはできません。このような場合にブレイカーやCB剤、(化学膨張剤)を用いる工法もありますが、生産性が低く、経済的ではありません。

そこで、これら諸問題を解決する工法として「予備発破工法」があります。この予備発破工法は、リッピング工法と発破工法をうまく組合せた工法で、他工法に比べ生産性、安全性に優れた最も経済的な工法です。

次にパンフレットの内容を紹介します。

予備発破のメカニズム



- 火薬量(原単位)は一般のベンチ発破に比べ1/3-1/4程度と少ない。
- 予備発破により通常弾性波速度は2/3-1/2程度に減少する。
- 無自由面発破なので、空中に放出される波動エネルギーが小さい(騒音値が小さい)
- ベンチ発破はある程度の斉発効果を必要とするが予備発破では各孔の火薬を、かなり時間差をおいて起爆しても、その効果が十分期待できるため振動値を小さくすることができる。

