

林道切取りのり面の安定性に関する研究：第1報 弾性波伝播速度測定器の開発

中尾, 博美
九州大学農学部

吉田, 瑞樹
九州大学農学部

<https://doi.org/10.15017/15919>

出版情報：演習林集報. 27, pp.1-11, 1980-03-29. Kyushu University Forests
バージョン：
権利関係：

林道切取りのり面の安定性に関する研究

第1報 弾性波伝播速度測定器の開発

中尾博美・吉田瑞樹

Studies on the Stability of the Cutting Slopes in the Forest Roads

(1) Development of an Apparatus for Measuring the Elastic Wave Velocity

Hiromi NAKAO and Mizuki YOSHIDA

1. 緒言

地中を伝播する弾性波は、その媒質の有する諸性質に応じて、特有の伝播速度と距離による減衰傾向を示すことが知られ、これらの指標を介して、表層や深層の土質・地質の探査が行われている。

すなわち、大地をいくつかの等方均質弾性体から成る多重層と仮定すると、これらを伝播する弾性波速度は、媒質の密度と弾性的諸性質——縦弾性係数、せん断弾性係数、ポアソン比——によって、ほぼ一定となり¹⁾、各層の有するこれらの性質の差異に従って、境界面で屈折し、または反射して地中を伝播する。

また、距離による振動振幅の減衰は、振動数、土質・岩質や含水状態によって異なった傾向を示すことが明らかにされている²⁾。

本研究は、土質層から、層理・節理など複雑な不連続面を有する風化岩質層まで、さまざまな多重層よりなる林道切取りのり面における弾性波伝播特性を明らかにし、その切取りのり面の安定性を判定する指標としての、弾性波伝播特性の有用性を検討することを目的としている。

本報では、弾性波伝播特性のうち、まず伝播速度を取り上げ、その速度測定器の製作と若干の検討結果について報告する。

2. 測定器の概要と動作原理

伝播速度測定器のブロック・ダイアグラムを図-1に示す。

計測に際しては、対象地盤表面の一測線上に振動源と振動の受信子として、2個の振動加速度計を設置する。振動源において、適当な方法で地盤に衝撃を加えると、発生した弾性波は、地盤を構成する媒質の弾性的性質に応じ、縦波、横波等となって、それぞれ特有の速度で伝播する。

この弾性波による地盤の振動を、まず、振動源に近い第1の受信子が感応し、その電気信号の入力により本測定器の計時カウンタを始動させる。その後、振動源より遠方側に設置した第2の受信子よりの信号入力により、計時カウンタを停止し、2個の受信子間の振動の伝播時間を測定する。典型的な2個の受信子の振動加速度波形を図-2に示す。その

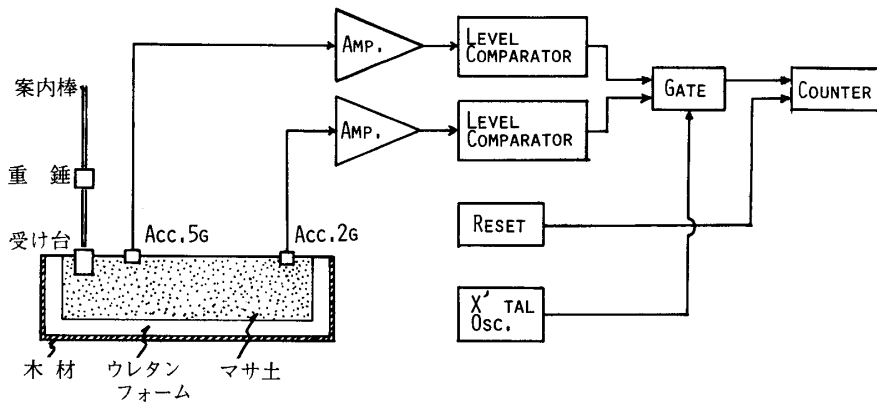


図-1 モデル地盤とブロック・ダイアグラム

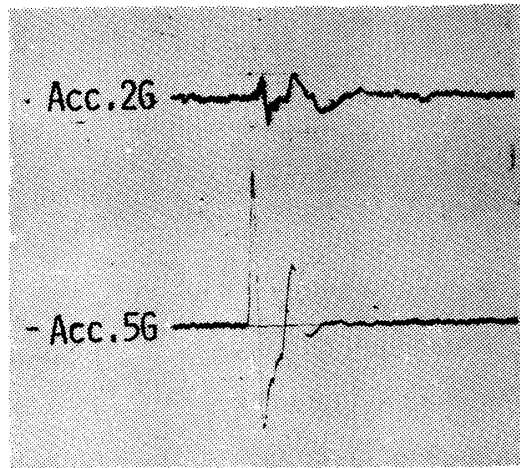


図-2 振動加速度波形

間の弾性波伝播速度は2個の受信子間の距離を伝播時間で除して求める。

つぎに、本測定器の動作原理を、ブロック・ダイアグラム(図-1)、回路図(図-3)、信号波形(図-4)により示す。一般に、回路図は主要な点だけを示すが、ここでは、読者の便宜を考えて、あえて、ほぼ全回路図を示した。なお、カウンタ回路は参考文献(3)を参照されたい。

まず、衝撃発生等、測定準備が整った時点で、リセット・ボタン(R)を押すと、Q10の5番端子は0から1に上昇する。今後、このような場合の電圧の変化を(0→1)と示すことにする。入力端(0→1)の変化に対応して、Q10は6番端子に500nsecの幅の短いパルスが発生する。このパルスは、カウンタの表示を0にすると同時に、F.F.1(Q7-1)に入り、ゲート1(Q7-3)を(0→1)にし、これをパルス通過可能な状態にする。

このF.F.1、ゲート1には、TTLのNAND GATE 7400を使用している。

(なお、本測定器に使用したTTLの簡単な動作原理については参考文献(3)、さらに詳細なデータについては参考文献(4)を参照されたい。)

この状態で、衝撃を媒質に加えると、第1の加速度計Acc. 5Gで生じた加速度に比例した電圧が、増幅され、その平衡出力がダイオード1N60 2個で整流されて、レベル・コンパレーター(Q2)に加えられる。このダイオードによる整流は、伝播波動の振動の向き

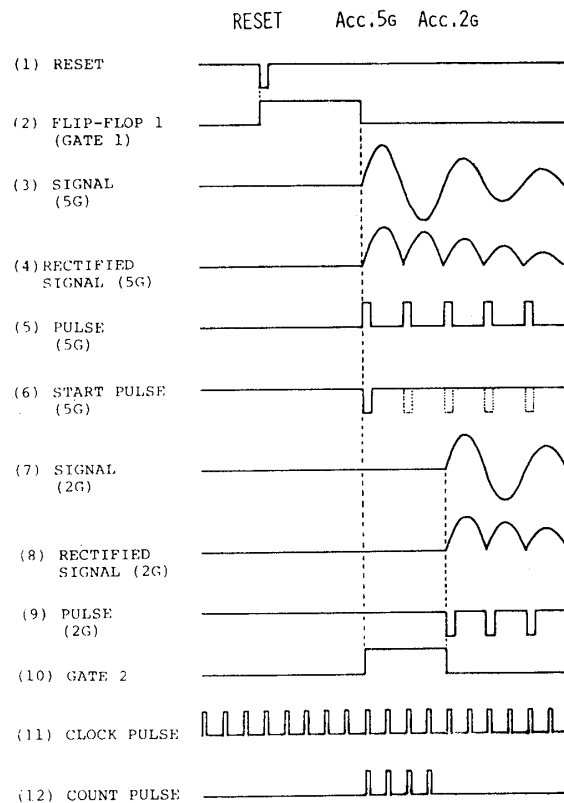


図-4 タイミング・チャート

如何にかかわらず、第1波に正の出力を生じさせるためである。これを図-4、(3)、(4)に示す。

レベル・コンパレータで入力信号の大きさを、ボルテージ・フォロウ (Q1) の参照電圧と比較し、これが設定電圧より高い電圧になると、レベル・コンパレータの出力は (0→1) と変化する。この (0→1) の信号入力により、モノステーブル・マルチバイブレータ (Q3) は、幅 500 nsec の短いパルスを出す。ゲート1、F.F. 1 (Q7-2) は負パルス (1→0) により (1→0) となり、ゲート1が閉じると同時に F.F. 2 (Q8-2) は (0→1) になりゲート2 (Q8-3) はパルス通過可能となる。この間のタイミングを図-4、(5)、(6)、(10) に示す。

その後、第2の加速度計 Acc. 2G からの振動によるシグナルが Q5 に入ると、Acc. 5G の場合と同じように、Q5、Q6、Q9-1 の働きで短い負パルスが生じる。このパルスが F.F. 2 に入り、ゲート2は (1→0) となって閉じる。この間、ゲート2の別の入力端子 (Q8-3⑨) には、間隔 1 μsec、10 μsec、100 μsec のパルスが時間分解能に応じて届くが、先の入力端子 (Q8-3⑩) が、1のレベルにある間だけ、このクロック・パルスは通過し、カウンタではこのパルス数を計数する。

F.F. 2の前に F.F. 1を設けたのは、つぎの理由による。すなわち、F.F. 1のみの場合は、図-4、(4)、(5)に見るように、Acc. 2Gのパルスが入った後に、Acc. 5Gの残余のパルスが入れば、ゲート2は (1→0→1→0→…) を繰り返す。計数を続けて正確な伝播時間の測定ができない。F.F. 1を設けることにより、Acc. 5Gの最初のパルスが入ると、ゲート1を閉じてその後の Acc. 5Gからのパルスは無視され、F.F. 2、ゲート2

はこのパルスには影響されない。

クロック・パルスは Q11-1, Q11-2 と 1 MHz X'tal とで形成され, バッファ (Q11-3) を経たのち, Q12, Q13 でそれぞれ, 1/10, 1/100 に分周される。必要に応じて, ロータリ・スイッチ (Ro. Sw.) でパルス間隔 1 μ sec, 10 μ sec, 100 μ sec のパルスを選択する。これは時間の分解能を決定する。

なお, 使用機器と回路素子の仕様は表-1, 表-2 のとおりである。

表-1 使用機器仕様

使用機器	型式・製作会社	備考
加速度計 (5G)	BA-5G-120 新興通信工業 K.K.	Acc. 5G
加速度計 (2G)	BA-2G-120 新興通信工業 K.K.	Acc. 5G
動歪測定器	MD-6E-B 東洋測器 K.K.	周波数特性 DC~1KHz 搬送周波数 5KHz
オシロスコープ	1725A YHP K.K.	

表-2 回路素子仕様

回路素子	型式・製作会社	備考
Op. Amp.	741 (TI)	Q1, Q4
Level Comparator	SN72311L (TI)	Q2, Q5
Monostable Multivibrator	SN74121N (TI)	Q3, Q6, Q10, Q14
Gate (Nand Gate)	SN7400N (TI)	Q7, Q8, Q11
Inverter (Open Collector)	SN7405N (TI)	Q9
X'tal Osc.	1 MHz	
BCD Counter	SN7490N (TI)	Q12, Q13
LED	Light Emitting Diode	D5, D6, D7, D8
Diode	1N60 (Germanium Diode)	D1, D2, D3, D4
Counter	5502 沖電気 K.K.	4-Digit BCD Decade Counter
Decorder	MSN561 沖電気 K.K.	BCD to 7-Segment Decorder
LED Digit Driver	MSL966 沖電気 K.K.	

3. 測定器の特性

ここでは振動受感素子と増幅器の周波数特性の伝送時間の測定に対する影響について述べる。

加速度計, 増幅器の型式は表-1 に示したが, 伝送時間測定装置の性能はつぎのとおりである。

図-1, 図-2 において, 第1の加速度計, Acc. 5G に波動が伝わり, つぎに離れたところにある第2の加速度計, Acc. 2G の加速度計に, いくらか減衰した波動が伝わったと

する。それぞれ増幅され、Acc. 5Gは図-2のQ2, Acc. 2GはQ5の入力端に伝わる。作動時間の速度を決定するICの中で、もっとも遅いのはQ2, Q5であり、これらにはレベル・コンパレータ SN72311のICを使用している。このICはメーカ発表のデータ⁵⁾によれば、20mVのステップ・ファンクションの入力で出力電圧の変化の遅れは500nsec以内である。すなわち、少なくとも、本器では入力端が20mV変化すれば、その後、500nsec以内にスタート・パルスまたは、ストップ・パルスが生じる。したがって、1μsecの分解能を持ちうる。このため、最大1MHzのクロック発振器を持ち、1μsecの時間分解能で伝送時間が測定可能である。

つぎに、加速度計のブリッジを含んだ増幅器の周波数特性について議論する。5KHzの正弦波交流をひずみゲージを含むブリッジの両端にかけ、この周波数でR.Cバランスをとる。ひずみゲージにストレスが加わるとブリッジに不平衡を生じ、この不平衡電圧を増幅し、同期整流して、加速度に比例する電圧を得る。この方法で、DC-1KHzの周波数特性を得ている。この方法は手軽に直流増幅器が手に入らない場合の増幅方法であるが、欠点は周波数特性が数KHzどまりであるということである。

t=0で第1の受信子、Acc. 5Gに

$$f(t) = A_0 e^{-\lambda t} \sin \omega t$$

の減衰正弦波が加わったとする。

この時、増幅器の出力電圧の変化率、 $\left(\frac{df}{dt}\right)_{t=0}$ は、

$$\left(\frac{df}{dt}\right)_{t=0} = (-A_0 \lambda e^{-\lambda t} \sin \omega t + A_0 \omega e^{-\lambda t} \cos \omega t)_{t=0} = A_0 \omega.$$

となる。

したがって、正弦波の変化から、スタート・パルスが出るまでの時間、 τ_d は、コンパレータのレベル変換に必要な電圧の変化をvとすれば、

$$\tau_d = \frac{v}{\left(\frac{df}{dt}\right)_{t=0}} = \frac{v}{A_0 \omega}$$

となる。

レベル・コンパレータの所要変化電圧をv=20mV, 周波数をf=1KHzとすると、 $A_0=10$ (Volt), $\omega=2\pi f=6.28 \times 10^3$ (rad/sec)を代入し、

$$\tau_d = \frac{20 \times 10^{-3}}{10 \times 6.28 \times 10^3} = 0.318 \text{ (}\mu\text{sec)}$$

を得る。

したがって、加速度計に波動が受感され、Q3のスタート・パルス、Q6のストップ・パルスが発生するまでの遅れ時間の合計は、1μsec以下であり、当初の目的に一致する。

少なくとも、 $\omega=6.28 \times 10^3$ (rad/sec) [=1KHz]の正弦波を与えることが可能であれば、1μsecの分解能で時間間隔を測定することが可能である。

たとえば、土質層を伝播する横波の速度は数十～数百m/secの範囲であり、仮に50m/secと仮定すると、50cm離れたところへ伝播するのに要する時間は 10^{-2} secである。した

がって、4桁の精度を得るためには、時間分解能は $1\mu\text{sec}$ で十分である。

4. 測定器の検定

本測定器の検定のため、弾性波発生・伝播用地盤モデルを製作した。(図-1参照)

この地盤モデルとしては、木製函体(板厚:2cm, 深さ:19cm, 幅:27cm, 長さ:94cm)に緩衝材としてウレタンフォーム(厚さ:5cm)を側壁と底面に内貼りし、これに媒質としてマサ土(粒径:2mm以下, 風乾状態)を詰めたものを用いた。

衝撃は、鉄製円筒型重錘(高さ:4.5cm, 直径:3.5cm, 重量:250g)を鉄製円筒型受け台(高さ:6.5cm, 直径:5.0cm, 重量:1kg)に約10cmの高さから落下、衝突させて発生させた。

受信子の加速度計は、波動進行方向に対し直角の、鉛直方向の振動を受感するように設置した。

実測の際に、計測精度に影響をおよぼすと思われる以下の事項について検討を行った。

(1) 加速度計(Acc. 2G)の信号回路における閾値(スレッシュホールド・レベル)とレベル・コンパレーターの立ち遅れ時間(図-5, 写真-1)

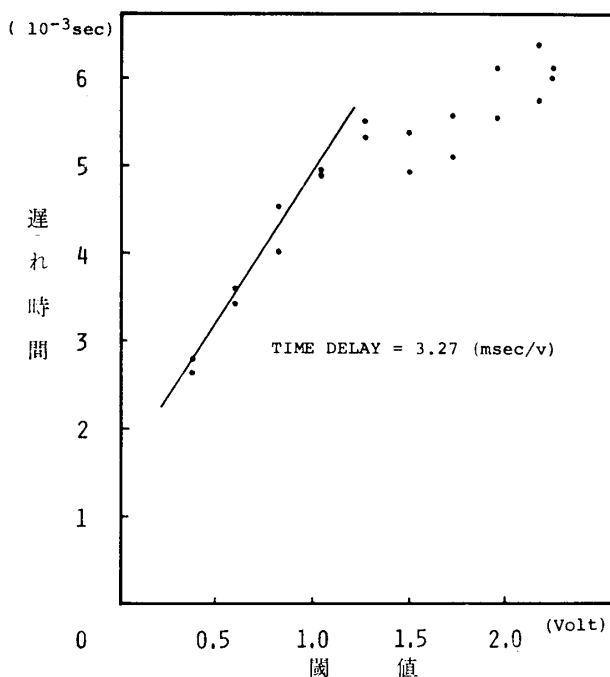
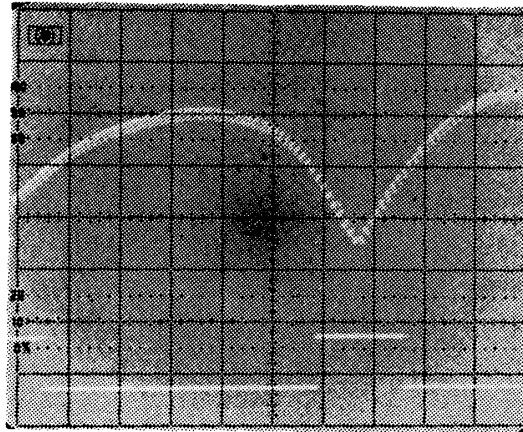


図-5 閾値と遅れ時間(Acc. 2G)

第1の加速度計(Acc. 5G)のスレッシュホールド・レベルを一定(約0.38V)にし、第2の加速度計(Acc. 2G)回路のスレッシュホールド・レベルを変え、矩形波出力の遅れ時間をオシロスコープにより求めた。

受信子間隔を一定(約15cm)とし、振動源において衝撃を加え、Acc. 2Gのダイオード(D3, D4)の振動加速度の出力電圧でトリガーをかけ、コンパレーター(Q5)の出力波形をオシロスコープ画面で写真撮影した。この写真上で、Acc. 2Gのスレッシュホールド・レベルとコンパレーター出力波形の反転時間の変化を読みとった。写真-1はその1例で、スレッシュホールド・レベル、1.5Vにおける振動加速度波形(CH. 1)とコンパレー



Ch. 1: Acceleration of Vibration, 2v/DIV
2ms/DIV
CH. 2: Output of Comparator (Q5) 5v/DIV

写真-1 振動加速度波形とコンパレータ
-出力波形 (Acc. 2G)

ター出力波形 (CH. 2) を示す。

Acc. 2G のスレッシュヨルド・レベルを 0.38~2.25V まで変化させた場合の測定時間の変化は図-4 のとおりで、残留変調波レベル近傍で 3.27msec/V であった。前述の論議より精度が悪いのは、ここで用いた衝撃発生法では低い周波数の振動加速度しか発生させ得なかったためであると考える。

(2) 加速度計 (Acc. 5G) の信号回路における閾値 (スレッシュヨルド・レベル) とレベル。コンパレーターの立ち遅れ時間 (図-6, 写真-2)

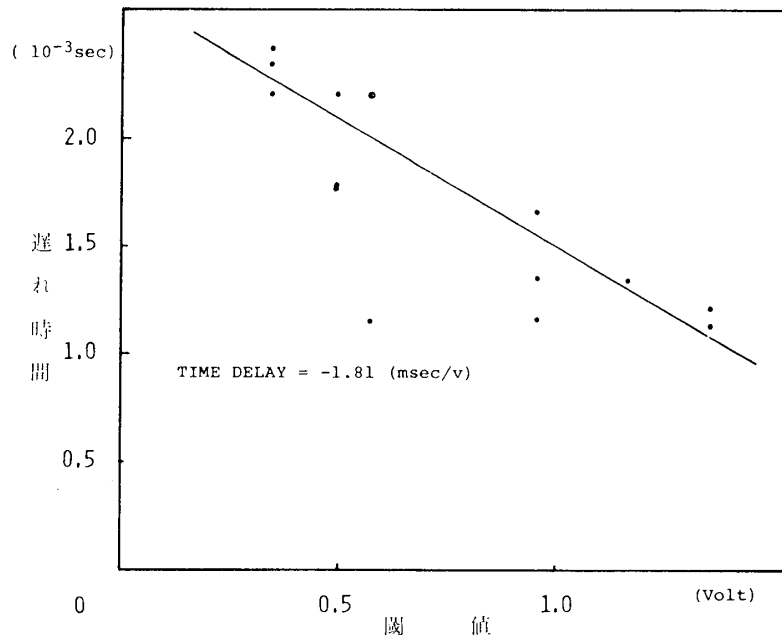
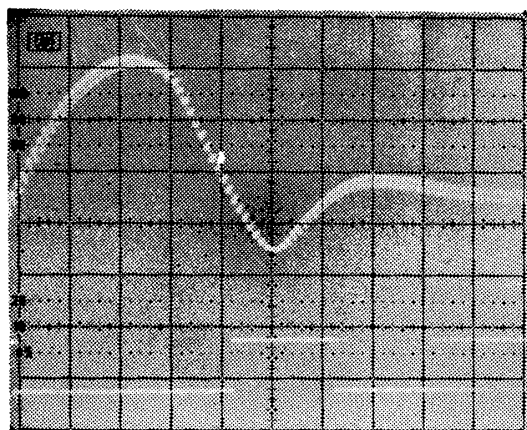


図-6 閾値と遅れ時間 (Acc. 5G)

第1の加速度計 (Acc. 5G) 回路のスレッシュヨルド・レベルとコンパレータ出力波形の反転時間の变化を前項と同様の方法で測定した。写真-2はその1例で、スレッシュヨル



CH. 1: Acceleration of Vibration, 2v/DIV
2ms/DIV
Ch. 2: Output of Comparator (Q2) 5v/DIV

写真-2 振動加速度波形とコンパレータ
-出力波形 (Acc. 5G)

ド・レベル, 0.96V における振動加速度波形 (CH. 1) とコンパレータ出力波形 (CH. 2) を示す。

Acc. 5G のスレッシュホールド・レベルを 0.35~1.36V まで変化させた場合の測定時間の変化は図-5 のとおりで, 残留変調波レベル近傍で -1.81msec/V であった。

スタート・パルス (Acc. 5G) の立ち遅れは計測時間を短縮し, 逆にストップ・パルス (Acc. 2G) の立ち遅れは計測時間を延長するので, 両者を含んだ計測時間の誤差は, それらの差,

$$3.27 - 1.81 = 1.46 (\text{msec/volt})$$

となる。

本測定器系の残留変調波レベルは, 短期変動で 50mV 以下であるので, 時間測定における誤差は $100\mu\text{sec}$ 以下にとどまる。

(3) マサ土モデル地盤の伝播速度測定例 (図-7)

前記マサ土モデル地盤で, 受信子間隔 10cm~60cm の範囲で 10cm 間隔毎に本測定器によって伝播時間を測定した。加速度計は波動伝播の進行方向に直角な鉛直方向の振動成分を受感するように設置した。測定回数は, 各距離において15回ずつである。

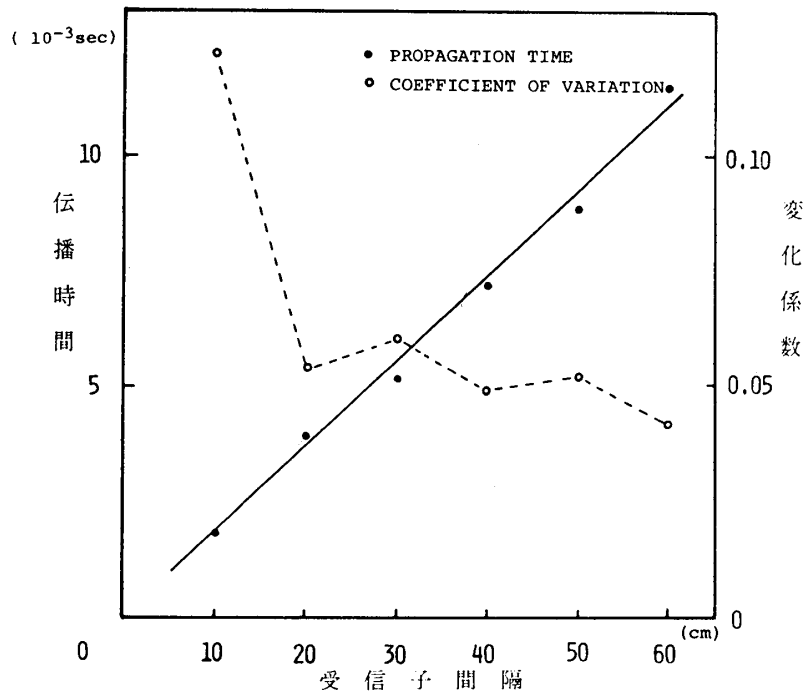
受信子間隔別の伝播時間と, 同一間隔における測定値の変化係数を図-6 に示す。

$$\text{変化係数} = \frac{\text{標準偏差}}{\text{平均値}}$$

測定間隔 10cm の場合にやや高い変化係数を示したが 20cm 以上になると, 変化係数は約 0.05 となり, 精度の高い測定値が得られることが分った。

伝播時間は受信子間隔に比例して直線的に増加し, その直線の勾配, すなわち平均伝播速度は約 55m/sec である。

なお, このマサ土の三軸圧縮試験の結果として得られた弾性的性質はつぎのとおりである。



図一七 受信子間隔と伝播時間およびその変化係数

縦弾性係数 $E=126 \text{ kg/cm}^2$

単位体積重量 $\gamma=1.39 \text{ g/cm}^3$

ただし、

拘束圧 $\sigma_3=1.0 \text{ kg/cm}^2$

ひずみ速度 $0.4\%/分$

$0.7\%/分$

$1.3\%/分$

ポアッソン比 $\nu=0.35$ (仮定)

この静的弾性係数をもとに弾性波伝播速度の理論値を求めると、

縦波 $V_p=119 \text{ m/sec}$

横波 $V_s=57 \text{ m/sec}$

である。

5. ま と め

製作した弾性波伝播速度測定器は、室内実験の結果、満足すべき精度を有することが分かった。すなわち、1 KHz 位の振動波形を使えば、時間分解能を約 $1 \mu\text{sec}$ まで高められる可能性をもっている。

今後に残る問題としては、振動発生方法があり、本報において採用した衝撃発生方法では高々 100Hz 位までしか振動数を高め得ない。このため、時間分解能が $10 \mu\text{sec}$ まで低下している。

屋外における計測に際しても利用可能な、しかも振動数の高い振動発生方法の開発を行いたい、

参 考 文 献

- 1) F.E. Richart, Jr., J.R. Hall, Jr., and R.D. Woods (岩崎敏男, 嶋津晃臣共訳) : 土と基礎の振動, 鹿島出版会, 1975, 東京
- 2) T.G. Gutowski and C.L. Dym: Propagation of Ground Vibration: A Review, Journal of Sound and Vibration, 49(2). pp. 179-193, 1976
- 3) 千葉幸正 : IC 機器の設計, 産報, 1976
- 4) Texas Instrument: TTL Data Book, Texas Instrument, 1973
- 5) Texas Instrument: The Linear and Interface Circuits Data Book, Texas Instrument, 1973

Résumé

This study was initiated to study the possibility of using elastic waves-velocity and attenuation to evaluate the stability of cutting slopes in the forest roads.

In this report, an apparatus for measuring the velocity of elastic waves and the results obtained from this apparatus are reported on. This apparatus consists of two vibration pick-ups, amplifiers, wave-form rectifiers which rectify the signal at the balanced output of amplifiers, and an electronic stopwatch which measures the time intervals between the arrival of the first signal of near pick-up and that of the remote one from the impact point.

The characteristics of the apparatus are as follows:

(1) Up to a time resolving power of 1 μ sec, the time intervals could be measured by use of the appropriate impact technique. The elastic wave in the soil has a velocity of several ten~hundreds m/sec, so the velocity could be measured with an accuracy of better than 0.1%.

(2) The experiment was carried out by filling a wooden bin with decomposed granite, and from this, it became clear that the amount of scatter in the measured values was very small (coefficient of variation: 0.05), at distances above 20cm between the two pick-ups.