

表層に薄い高速度層がある場合の弾性波探査について ——簡易舗装道路面における弾性波探査——

五十嵐亨・横矢直道

THE SEISMIC REFRACTION SURVEY ON THE PAVED ROAD

Toru IGARASHI and Naomichi YOKOYA

Abstract

In generally, when the surface layer is more high velocity than the under ones, we have no seismic refraction analysis method. But, we expect, the high velocity layer being thin, that we will analysis underground structures without the effect.

Then, we did seismic refraction survey on the paved road of which the surface layer was thin and high velocity. The head waves, which obtained by this seismic refraction survey, showed high frequency, small amplitude waves, and quick decay with distances. Then, we cut off these high frequency waves through the low pass filter(112Hz), made travel-time curves by the first arrival, and so calculated underground structure.

Otherwise, we obtained the upper line of rocks, which could not be dug by the power shovel.

And so, we compared the calculated underground structure with the upper line of rocks, and found that these were very equivalent.

1 はじめに

屈折法弾性波探査によって地下構造を解析するには、地表より漸次深度が増すにつれ弾性波速度の速い層が存在することが必要条件となっている。したがって、表層に高速度層が存在する場合には、表層と第2速度層との境界を伝播し、地表に現れる屈折波は存在せず、地下構造を推定することは不可能である。したがって、アスファルトで簡易舗装された道路のような場合には、路面上において屈折法弾性波探査を実施しても、路面下の地盤の状況は解析できないということになる。

しかし、表層の高速度層が薄い場合、その高速度層を伝播する振動のエネルギーは小さくかつ減衰が速いこと、また表層上面に振動源を考えた場合、第2速度層以下にも振動源のエネルギーが直接伝わり易く、したがって、第2速度層以下の層からの屈折波が観測されることが予想される。そこで、表層の高速度層を伝播する波と

第2速度層以下を伝播してきた波とが区別されるならば、第2速度以下を伝播してきた波の初動を用いて、解析を行うことは可能であると考えられる。

2 2次元弾性板中を伝播する波の速度

表層のアスファルト層の厚さは、その下部の地盤層にくらべて十分薄いものであるので、このアスファルト層中を伝播する波は、2次元弾性板中を伝播する波動と考える方が妥当であろう。

Ewing et al. (1957)によれば、2次元弾性板中を伝播する波の波動方程式は、つぎのように表される。

板を伝播する対称モードの波

$$\frac{\tanh\{(kH/2)\sqrt{1-C_2^2/V_s^2}\}}{\tanh\{(kH/2)\sqrt{1-C_2^2/V_p^2}\}} = \frac{\sqrt{1-C_2^2/V_p^2} \cdot \sqrt{1-C_2^2/V_s^2}}{(1-C_2^2/2V_s^2)} \quad (1)$$

板を伝播する非対称モードの波

$$\frac{\tanh\{(kH/2)\sqrt{1-C_1^2/V_p^2}\}}{\tanh\{(kH/2)\sqrt{1-C_1^2/V_s^2}\}} = \frac{\sqrt{1-C_1^2/V_p^2} \cdot \sqrt{1-C_1^2/V_s^2}}{(1-C_1^2/2V_s^2)} \quad (2)$$

ここに V_p = 3次元弾性体内を伝播するP波の速度
 V_s = 3次元弾性体内を伝播するS波の速度
 C_1, C_2 = 板の中を伝播する波の速度
 $k = \omega/C (\omega = 2\pi f, f = \text{周波数})$
 $2H$ = 板の厚さ

上記の式(1)および(2)において、 C は常に ω の関数であり、分散性の分枝が存在する。そこで、これらの式を用いて基本モードの解を計算するに当り、 V_p および V_s の値に対しては、アスファルトの試料を用いて室内試験から求めた値、 $V_p=3100\text{m/sec}$ 、 $V_s=1550\text{m/sec}$ を用い、板の厚さ $2H=0.1\text{m}$ として、通常弾性波探査で使用されている機器で観測可能な周波数領域 $10\sim 600\text{Hz}$ における速度を求めると、

- 対称モード波の位相速度 $\approx 2700\text{m/sec}$
- 対称モード波の群速度 $\approx 2700\text{m/sec}$
- 非対称モード波の位相速度 $= 60\sim 600\text{m/sec}$
- 非対称モード波の群速度 $= 100\sim 900\text{m/sec}$

となる。

以上の計算例によってわかるように、通常弾性波探査における周波数領域においては、2次元弾性板中を伝播する波に関しては、対称モードの波が初動として観測されることになる。このとき、観測される初動から計算される対称モード波の速度値は、実体波としてのP波速度値よりも常に小さい値を示す。

3 舗装道路下の速度構成

この実験を行った舗装道路の舗装面下の地盤の状況を知るために、道路路肩の地山が露出しているところで、

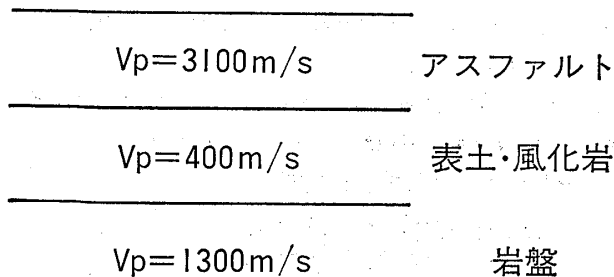


図-1 探査実施地区の速度層構成

通常弾性波探査を実施した。その結果、表層の速度が 400m/sec で、その下部に 1300m/sec の速度の層があることがわかった。おそらく、 1300m/sec の速度を示す層は凝灰岩の岩盤、 400m/sec の速度層は凝灰岩の風化部に相当するものであろう。一方、舗装材料であるアスファルトについては、採取した試料の室内試験によれば、 P 波速度 $= 3100\text{m/sec}$ 、 S 波速度 $= 1550\text{m/sec}$ 、密度 $= 2.34\text{g/cm}^3$ である。したがって、この舗装道路部の速度層構成は、おおむね図-1に示すように、 $V_{p1} > V_{p2} < V_{p3}$ となっているものと考えられる。

4 簡易舗装道路面上において観測された波動

凝灰岩地区の風化岩盤上に簡易舗装された道路面上で行った実験において、観測された記録の例を図-2に示す。測定は、地震計(固有周期 28Hz)を工作用粘土を用いて舗装路面上に 1m 間隔に設置し、鉄ハンマーで路面を直接打撃して起振する方法で行った。なお、記録はデータレコーダに磁気記録し、電磁オシログラフを用いて再生を行った。

図-2によれば、得られた波形は、最初に高い周波数の波(約 600Hz)が存在し、この波は距離とともに急速に減衰し、振源から 6m 以上離れた箇所では、この高い周波

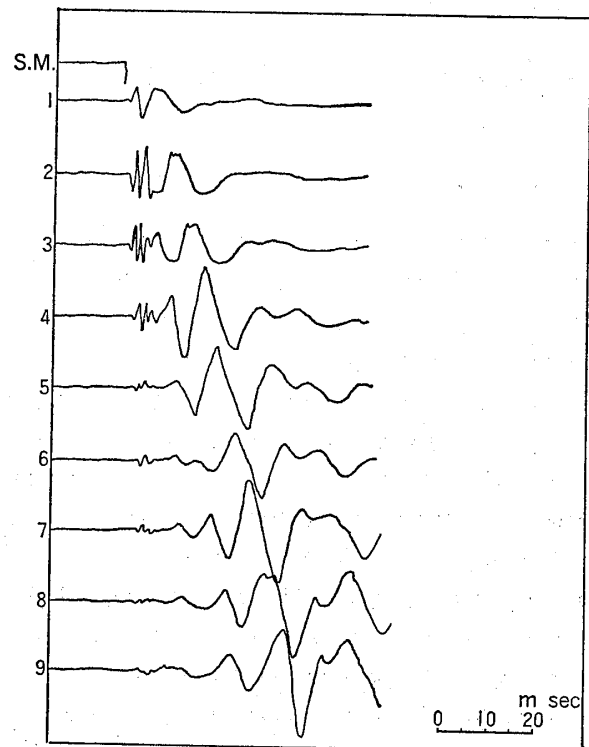


図-2 道路面上の起振点によって得られた波形

数の波はほとんど現れていない。一方、初動として現れる高い周波数の波の後には、これにくらべると低い周波数の波が続いており、これはすべての記録に現れている。

4-1 高い周波数の波の性質

図-2に示すような約600Hzの高い周波数を示す初動の到達時間を読み取り、走時曲線を作成すると、図-3のようになる。図-3によれば、高周波の波の速度は、約2500m/secであり、この値は、アスファルト試料の速度=3100m/secよりおよそ20%ほど小さい。

ところで、この舗装道路のアスファルトを弾性板と考

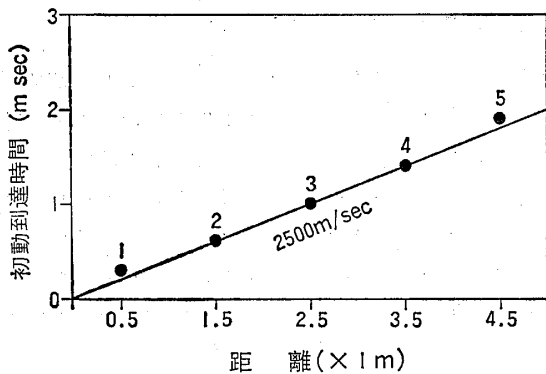


図-3 高い周波数の初動より得られた走時曲線

えた場合、板の厚さ $2H=0.1m$ とすれば、2章に示してあるように、このアスファルト板の中を伝播する対称モード波の位相速度値および群速度値はほぼ2700m/sec(周波数5000Hz以下で、この値を示す)である。この計算値と図-3に示した実測値には若干の差はあるけれども、実測された高い周波数の波は、アスファルト板を伝播してきた対称モード波と考えることができる。

4-2 後続の低い周波数の波の性質

図-2に示すように、高い周波数の波の後に続いて現れる低い周波数の波の速度は、位相によって異なるが、記録に現れた周波数範囲(60~40Hz)では、100~300m/secであり、これは、2章に示したように、アスファルトの弾性板を伝播する非対称モード波の速度と同じ程度の値である。

そこで、アスファルトのP波速度=3100m/sec、S波速度=1550m/sec、 $2H=0.1m$ として、式(2)を用い、周波数が0~100Hzの範囲の非対称モード波の位相速度(U_A)および群速度(C_A)を計算すると、図-4に示す C_A 曲線および U_A 曲線のようになる。この曲線から明らかのように、(群速度)>(位相速度)の関係があることがわかる。

一方、この実験を行った地盤の構造モデルを図-5に

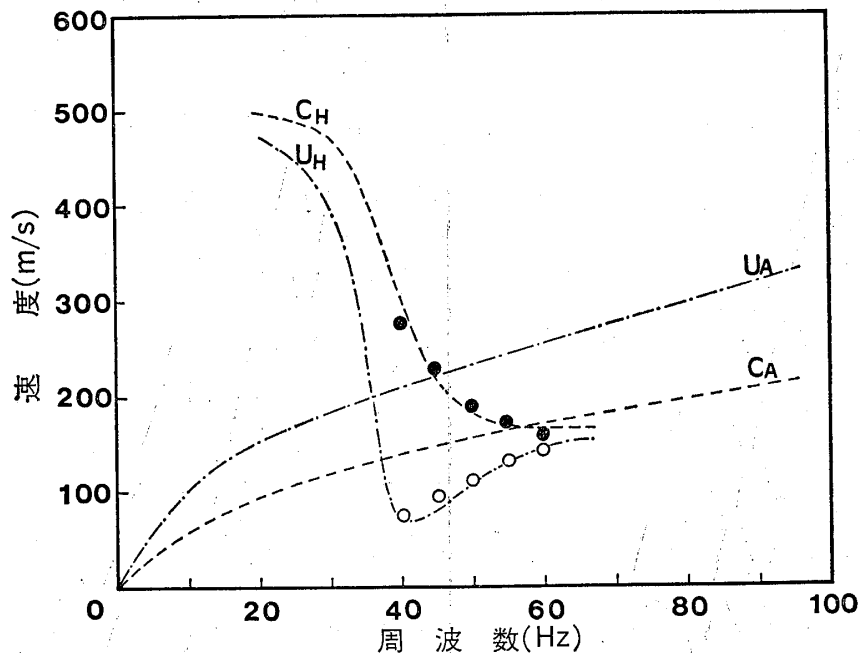


図-4 分散曲線

C_H, U_H =HASKELの方法で算出されたレーリー波の位相速度及び群速度
 C_A, U_A =板を伝播する非対称モード波の位相速度及び群速度
 ○, ●=観測された位相速度及び群速度

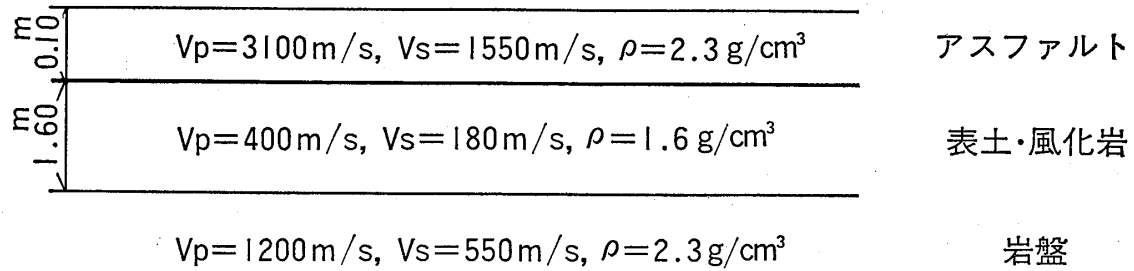


図-5 レーリー波の分散曲線の計算に用いたモデル

示すように設定し, Haskel の方法によってレーリー波の位相速度 (C_H) および群速度 (U_H) を計算すると, 図-4 に示す C_H 曲線および U_H 曲線が得られる。この曲線によれば, 20~60Hz の範囲においては, (位相速度) > (群速度) の関係があり, これは, さきに述べた板の非対称モード波の場合とは反対の様相を示している。

そこで, 観測された波動記録から卓越した波について求めた位相速度 (●) および群速度 (○) は, それぞれ, レーリー波の位相速度 (C_H) および群速度 (U_H) と一致している (図-4)。

したがって, 後続の低い周波数の波は, アスファルト板を伝播した波ではなく, 舗装下の地山を伝播してきた

波と考えることができる。

5 高い周波数の波の除去について

4章に述べたように, 起振点近くで卓越して観測される高い周波数の波はアスファルト板を伝播してきた波であり, その後に続いて現れる低い周波数の波はアスファルト面下の地山を伝播してきた波であることから, このアスファルト板を伝播してきた高い周波数の波を, なんらかの方法によって除去し, 地山を伝播してきた波の初動を使用すれば, 地下構造の解析が可能であると考えられる。

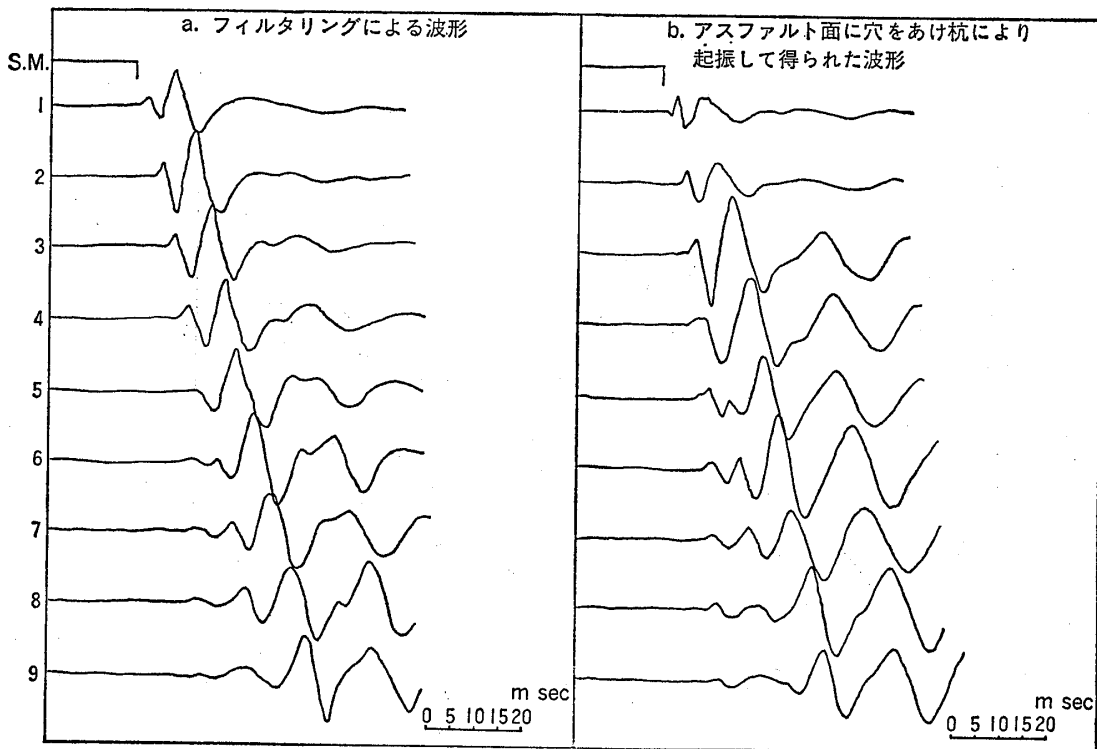


図-6 高い周波数の波を除去した結果

- a フィルターによって高周波を除去した後の波形
- b アスファルト面下の地盤上の起振点によって得られた波形

この高い周波数の波の除去方法として、つぎの2方法を試み、その比較を行った。

a) 高い周波数の波をフィルターで除去する方法

最初に観測される高い周波数の波は約600Hzであり、地山を伝播してきたと考えられる波の周波数は50~100 Hzである。したがって、高い周波数の波の継続時間内に、後続の波が包含されている場合は、ローパスフィルターにより高い周波数の波を除去すれば、地山を伝播してきた波のみの記録を得ることができるはずである。

そこで、図-2に示した観測により得られた記録について、ローパスフィルター(112Hz)を用いて、高い周波数の波を除去したときの波形を図-6(a)に示す。この図に示されている波形を、図-2に示されている波形とくらべると、各測点の記録の最初に観測される高い周波数の波は完全に除去されており、また、ある時間後の両者の波形は、ほとんど変化していない。このことは、図-6(a)に示す記録は地山を伝播した波によるものと考えられる。

b) アスファルトの下の地山に起振源を設置する方法
起振された波が直接アスファルト板を伝播しないよう

にするという考えに基づいて、起振点のアスファルトに穴をあけ、その穴に杭を立て、この杭を打撃し、直接地山表面を起振源とするものである。これによって、アスファルト板に直接入る波動エネルギーを極めて小さくすることができれば、さきに述べた高い周波数の波は記録の上には現れないか、あるいは現れても極めて小さく、地山を伝播してきた波の識別が容易になることが考えられる。

そこで、起振点位置のアスファルト部分に、直径が約10cmの穴をあけ、地山表面上に直径8cm程度の杭を立て、その頭部を打撃することによって観測した。得られた記録を図-6(b)に示す。この図に示されている波形には、起振点近傍を除くと、図-2に現れている高い周波数の波は全く見られない。なお、起振点近傍の記録では高い周波数の波の影響は極めて小さくなっているが、高い周波数の波の存在が認められる。

上述のように、高い周波数の波を除去するために行った2つの方法の結果を比較すると、図-6の(a)と(b)に示すように、それらの波形は非常によい一致を示している。このことは、簡易舗装された道路面上において弾性

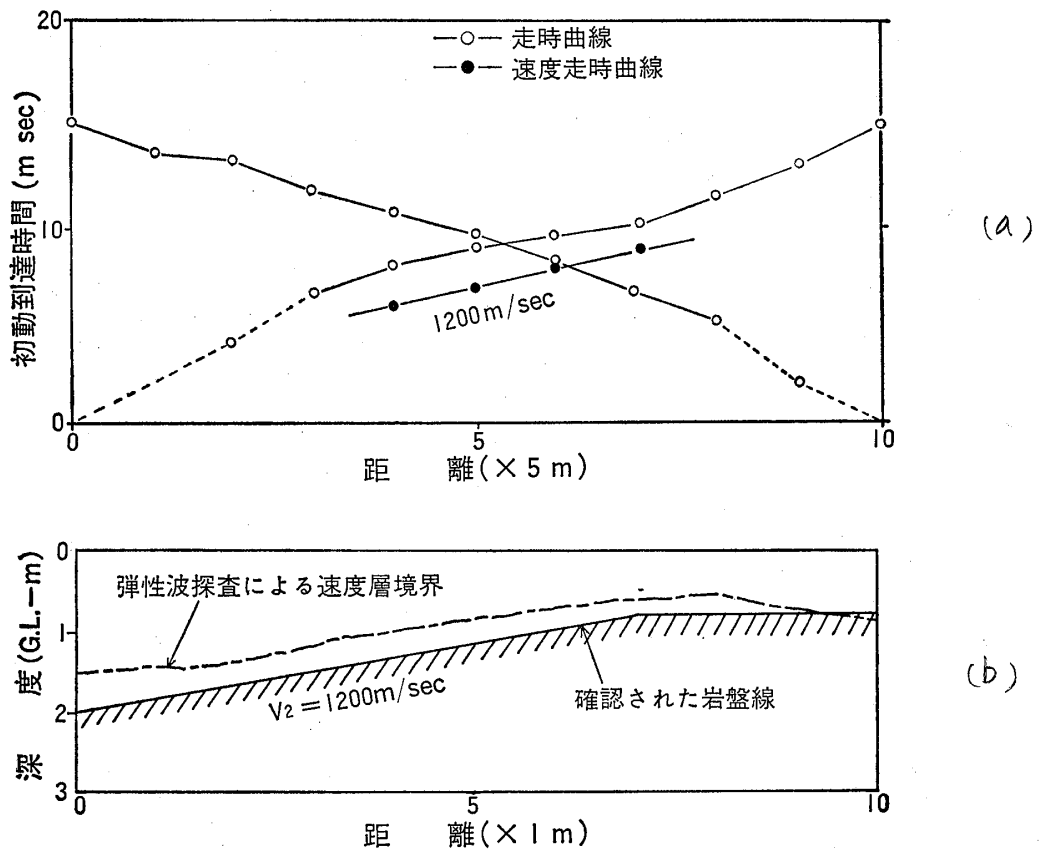


図-7 弾性波探査結果と実際との比較

波探査を実施する場合、路面のアスファルトを損傷することなく観測を行い、記録に現れるアスファルト板を伝播してきた高い周波数の波を除去することにより、路面下の地山を伝播してきた波による記録が得られることを示している。

6 走時曲線の解析と実際の構造との比較

5章で述べたように、高い周波数の波を除去した記録は、アスファルト部がなく、直接地山上面において観測されたものに相当すると考えることができる。そこで、道路を横断する方向に長さ10mの測線を設け、1m間隔に受振器を設置し、測線の両端を起振点として、アスファルト表面上において観測を実施した。得られた記録から、ローパスフィルターを用いて高い周波数の波を除去し、地山を伝播してきたと考えられる波の初動によって作成された走時曲線を図-7(a)に示す。高い周波数の波を除去後の記録においても、起振点近傍においては、初動の読取りが他のものに比べて困難であった。これは、アスファルト板を伝播してきた高い周波数の波を除去したとはいえ、その後の位相に含まれるより低い周波数の波が残っており、これが地山を伝わってきた波と重なっているためと思われる。これらの部分は破線で示してある。

図-7(a)に示す走時曲線の形から判断すると、2層構造であることが想定される。破線で示した区間の走時から速度を計算すると、図の左側で450m/sec、右側で350m/secが得られ、これらの値は、図-1に示すように、直接地上で行った測定から求めた上層の速度値(400m/sec)とほぼ等しい。したがって、これら破線区間の走時は、上層部を伝播した直接波によるものと考えられる。また、萩原の解析法によって速度走時を求めると、図中の黒丸のようになり、下層の速度は1200m/secであることがわかった。この値は図-1に示す下層の速度値(1300m/sec)とほぼ等しい。

上述のことは、アスファルト表面上において測定した記録から、アスファルト板中を伝播した高い周波数の波を除去した記録を用いて作られた走時曲線の使用に対する妥当性を示しているものと考えられる。

この走時曲線を解析の結果、求められた岩盤(1200m/sec)上面の深さを図-7(b)に示す。

上の測線部分について、弾性波探査実施後、測線を中心に巾約2m、深さ約4mの掘削が行われた。掘削の進行に伴い、土砂・風化岩の部分と岩盤の部分を目視で判定し、この測線下における岩盤上面深度を求めた。その結果を図-7(b)に合せて示してある。

この図によれば、弾性波探査によって計算された岩盤面は、掘削によって判定した岩盤面に比べ、全体的に浅くなっているが、その差は平均的にみて20cm程度であり、計算と判定の双方に含まれる誤差のことを勘案するならば、良く一致しているといえるであろう。

7 あとがき

この報文では、簡易舗装道路下の地山の地下構造調査において、アスファルト部分に損傷を与えることなく弾性波探査を実施することの可能性と、記録の処理について述べた。しかしながら、実際の現場における各種の条件、例えば、アスファルト部の厚さ、地山部の速度値、とくに地山上層の厚さ、などの相異によっては、記録波形に及ぼす影響が異なることが考えられる。したがって、今後、いろいろの条件のもとでの実験を行い、適用条件を明確にするとともに、記録方法ならびに処理方法の改良をするつもりである。

参 考 文 献

- Ewing, W. M., W. S. Jardetzky and F. Press (1957):
Elastic Waves in Layered Media, McGrawhill
Book Company, Inc.