

豊平峡ダム基礎岩盤の弾性波伝播速度測定について

海津節雄* 木館静吾*

1. ま え が き

わが国において築造されたハイダム(High Dam)は、コンクリートダム(Concrete Dam)が多く、従来はほとんど重力ダム(Gravity Dam)であったが近年ではアーチダム(Arch Dam)の築造が多くなってきた。当豊平峡ダムは、北海道開発局で計画されたアーチダムである。アーチダムの場合、重力ダムの場合に比べ基礎の力学性について厳密な調査が必要であり、当ダムにおいても、岩盤の種々の力学試験が行なわれているが、その一端として弾性波の速度測定を行なった。岩盤内の弾性波伝播速度測定は、

- 1) 岩盤を弾性体と考えて弾性係数(Young's Modulus)を求める。
- 2) 速度値から直接岩質の良否を推定する。

この2つの目的をもって通常行なわれる。本測定は速度値から直接岩質の良否、あわせて岩盤掘削線を推定することを目的として、42年1月に約1週間にわたって弾性波伝播速度測定を行なった。ここにその結果を報告するものである。

なお、使用器械は米国 E.T.L 会社製 PRAZ 型屈折用地震探鉱器24成分であって、上下動18 C.P.S の Pick up を Single で用いた。

2. 弾性波速度測定について

弾性波動の理論によれば、無限に拡がった均質等方な弾性体の一部に乱れを生ずると、そこから容積変化の状態の伝わる疎密波(縦波 Longitudinal Waves)と、容積は一定でよじれの状態変化の伝わるよじれ波(横波 Transverse Waves)の2種類の波動が発生し、それが伝播することが明らかにされている。これらの波の伝播速度をそれぞれ V_P , V_S , とすると、

$$V_P = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1 - \sigma}{(1 + \sigma)(1 - 2\sigma)}}$$

$$V_S = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} = \sqrt{\frac{E}{\rho} \cdot \frac{1}{2(1 + \sigma)}}$$

ρ : 密度 μ : 剛性率

E : 弾性係数 σ : ポアソン比

λ : ラーメ常数

となる。すなわち、 V_P , V_S は波が伝播する媒質の弾性係数、密度、ポアソン比の関数であって弾性波速度はこれら3つの要素によって決められる。

また $\frac{V_P}{V_S} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\mu}} = \sqrt{\frac{2(1 - \sigma)}{1 - 2\sigma}}$ であって、常に

$V_P/V_S > 1$ である。すなわち縦波の速度は横波の速度より常に大きい。以上2種類の波のほか、表面があるとき、すなわち、半無限の弾性体の場合、その表面にそって一種の波動が伝播する。この波はレーリー波(Rayleigh's Waves)と呼ばれその速度を V_r とすれば、ポアソン比が0.25のときに $V_r = 0.92 V_S$ の関係がある。さらに半無限弾性体の表面に、これとは弾性の異なる一様な厚さの層があるとき、波の進行方向に直角で水平方向に振動する一種の表面波が存在する。これは一般にラブ波(Love's Waves)と呼ばれているものである。この波の速度は波長によって異なるのであって、波長がきわめて短くなった極限においては、表層のS波の速度に等しくなり、長くなった極限においては、下層のS波に等しくなるものである。以上のように物質中を伝播する波には4つの性質の異なる波があるのであるが、縦波の速度は他のいずれのものよりも大きい。ゆえに、ある任意の点において発生した波を他の任意の点で観測した場合、最初に到達した波が縦波であることは明らかで、この波を記録の上で識別することは容易である。しかし、横波は縦波の初動後に到達するため縦波の初動後に現われる波と重なって現われ、一般に識別することは困難である。また、そのエネルギーも小さいので、縦波と同時に観測することは不可能といってもよい。横波の観測には、特別に横波発生装置が用いられているが、これは主として、表面で波を発生させ、表面で観測するものであって、表面波も同時に観測される。この場合ききに述べたように、レーリー波であれば、 $V_r = 0.92 V_S$ であって、記録の上から両者を識別することはむずかしい。したがって、現状では主として縦波の観測が行なわれている。

*地質研究室

3. 弾性波速度測定法

現在行なわれている測定法には、現地の状況で異なるが、次に述べる3つの方法がある。

1) 屈折波法

この方法は、従来行なわれている屈折波法と原理的に同じである。横坑内に測線を設け、地震計を2~3m程度の間隔に設置し、その両端、必要があればその中間に爆発点 (Shot Point) を設け、爆薬は爆発点の状況に応じ増減して測定を行ない、走時曲線 (Travel-Timecurve) (図-1 参照) を求め、これから速度、層厚を求めるのである。

2) 平均速度法

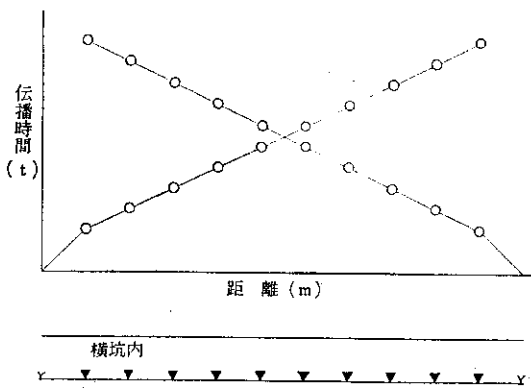


図-1

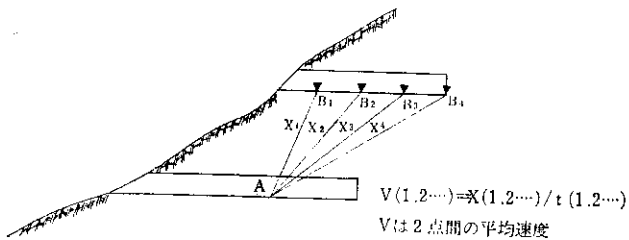


図-2

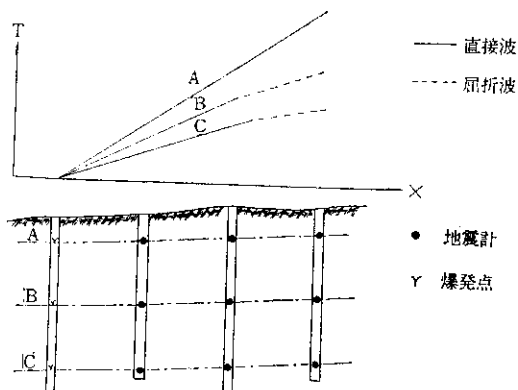


図-3

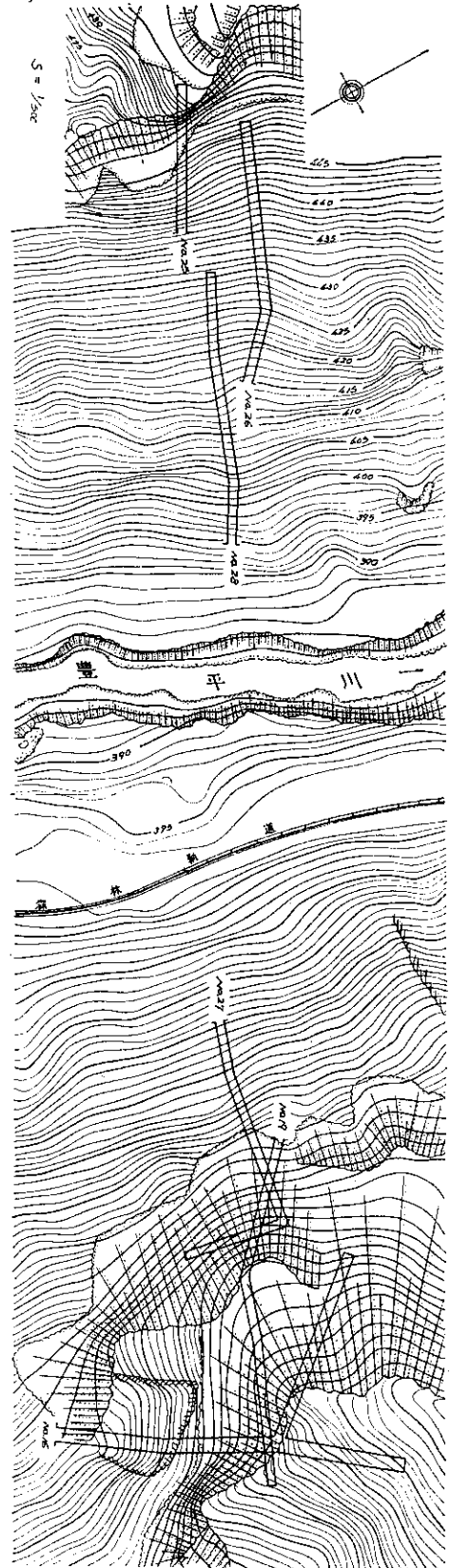


図-4 測定横坑位置図

図-2に示すように、任意の横坑内(A)に地震計を設置し、他の横坑内(B)に爆発点を設け、その距離をXとし、AB2点間を伝播する波の時間をtとすると、 $V=X/t$ によって求められるVをその2点間の平均速度とする。実際の岩盤は均質でなく、また深部に行くにつれ速度が漸次増加する場合が多い。そのため実際には、波は爆発点と地震計を結ぶ直線を伝播するのではなく、最短時間経路を伝播するのであるが、一般には2点間を結ぶ直線上を伝播するものとして、距離を求めてもさしつかえないとされている。

3) 直接波法

この方法は、爆発点から地震計に到達する波のうち、

直接波とみなされるものから速度を求めるのであって、岩盤内部の速度分布をくわしく調べる場合に適切な方法である。図-3に示すように、岩盤に一直線になるように数m間隔に穿孔し、岩盤内部に測定線A,B,Cを設け、それぞれの測定線について測定を行なうのである。

4. 豊平峡ダムサイトの速度測定

本測定は図-4に示すように、調査横坑、右岸No.16, 19, 27号坑左岸No.25, 26, 28号坑において、横坑内での屈折波法および横坑間での平均速度法による速度測定を行なった。

1) 横坑内での屈折波法による速度測定

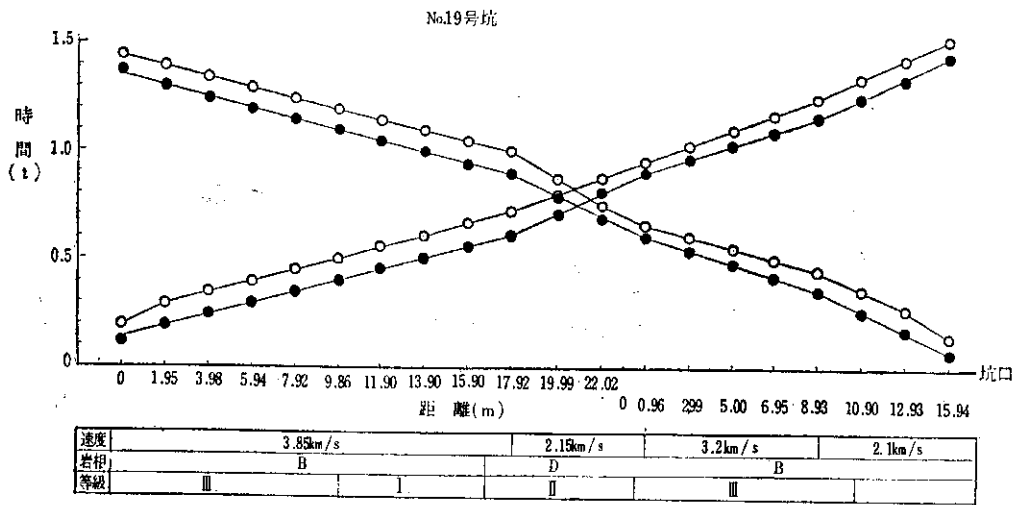


図-5-1 走時曲線(横坑内)

測定は、横坑No.19, 27, 25, 26, 28号坑について行なった。横坑内の岩盤上に直線になるように測線を設け、2m間隔に地震計(11~20個)を設置し、爆発点間隔を20~40mとし、爆薬量は100~200gを使用して往復測定を行なった。測定の結果、すべての横坑は、掘削によるゆるみおよびその後の風化作用のためと考えられる1.0km/sec以下の薄い低速度層が存在する2層構造であることがわかった。第2層すなわち岩盤の速度は2.5~3.8km/sec層が大勢を占めるが、速度分布は一様でなく部分的に低速度層が見られる。地質調査の結果分類された岩相および岩盤の等級分類との関係は判然としない。なお走時曲線および解析結果は図-5に示すとおりである。

2) 横坑間での平均速度法による速度測定

測定は、横坑内での屈折波法の際に設置した地震計をそのままにし、他の横坑から300~400の爆薬により震動を与え測定した。測定の結果得られた平均速度値を同じような速度値を示す部分ごとに、その平均値を求め平均速度とした。速度範囲は2.5~4.4km/sec速度を示し、

図-6~9に示す横坑間平均速度平面図および断面図は平均速度値を0.5km/sec単位に区切り、速度層区分を行なったものである。なお横坑内屈折波法の結果と同じように速度層分布が一様でなく部分的に低速度層が見られる。

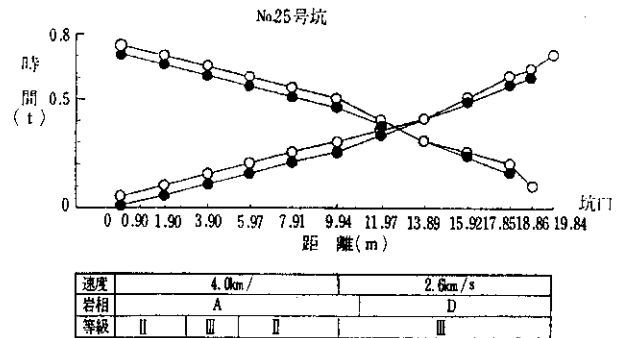


図-5-2 走時曲線(横坑内)

5. 考察

1) 横坑内屈折波法速度および横坑間平均速度の測定結果からダムサイトの速度分布図を作成すると図-10

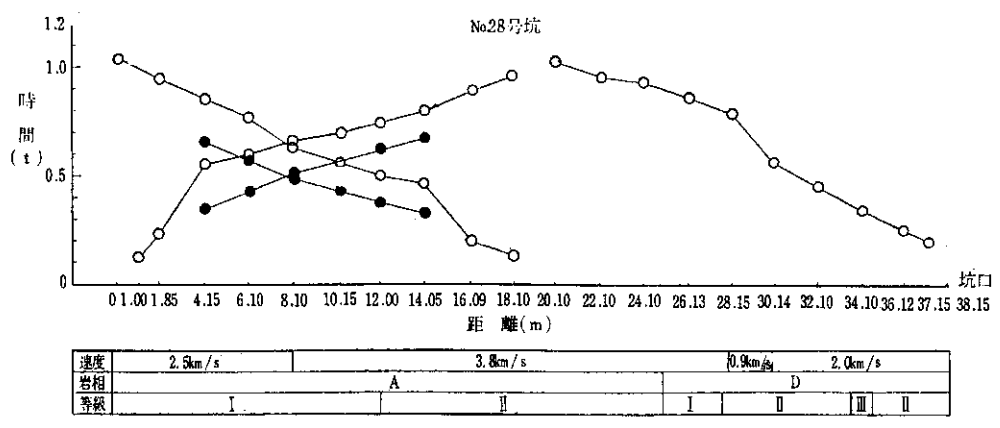
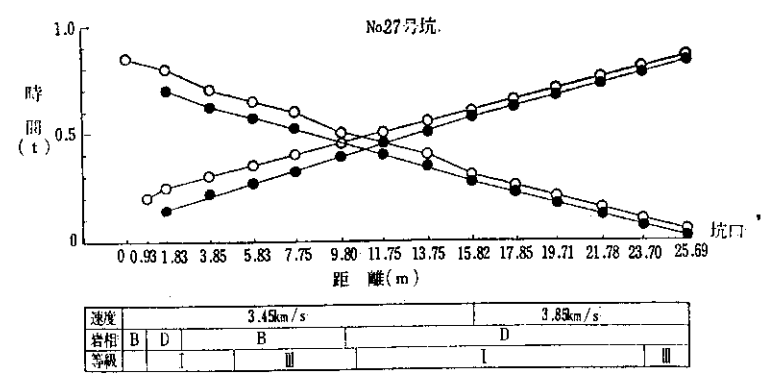
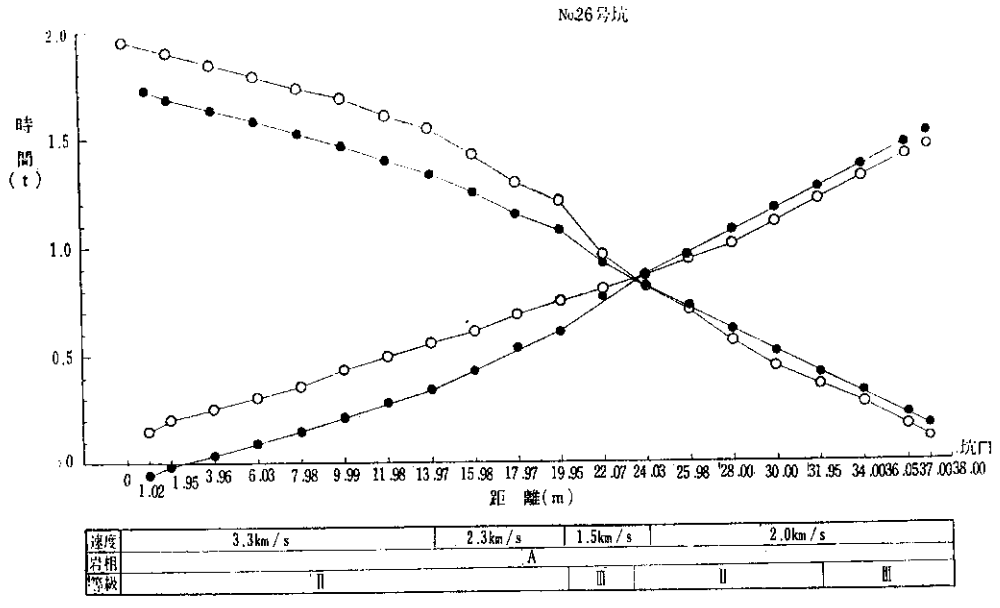


図-5-3 走時曲線(横坑内)

定 10

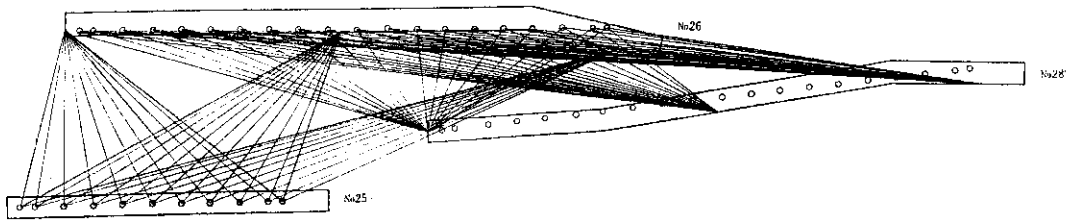


图-6 横坑間平均速度平面图

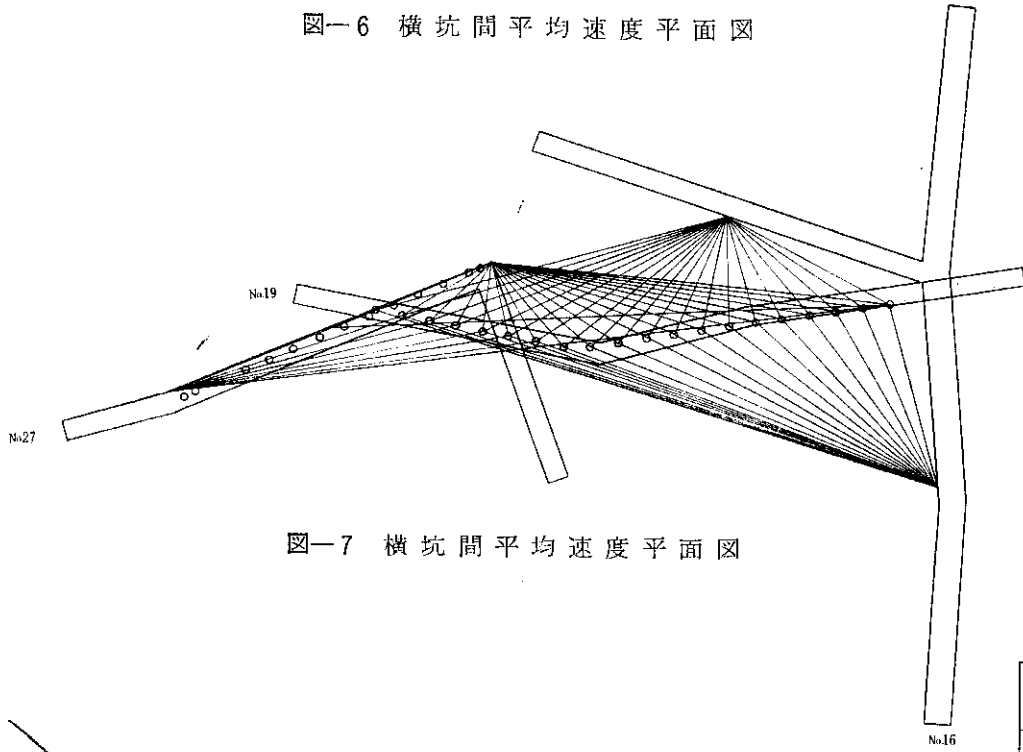


图-7 横坑間平均速度平面图

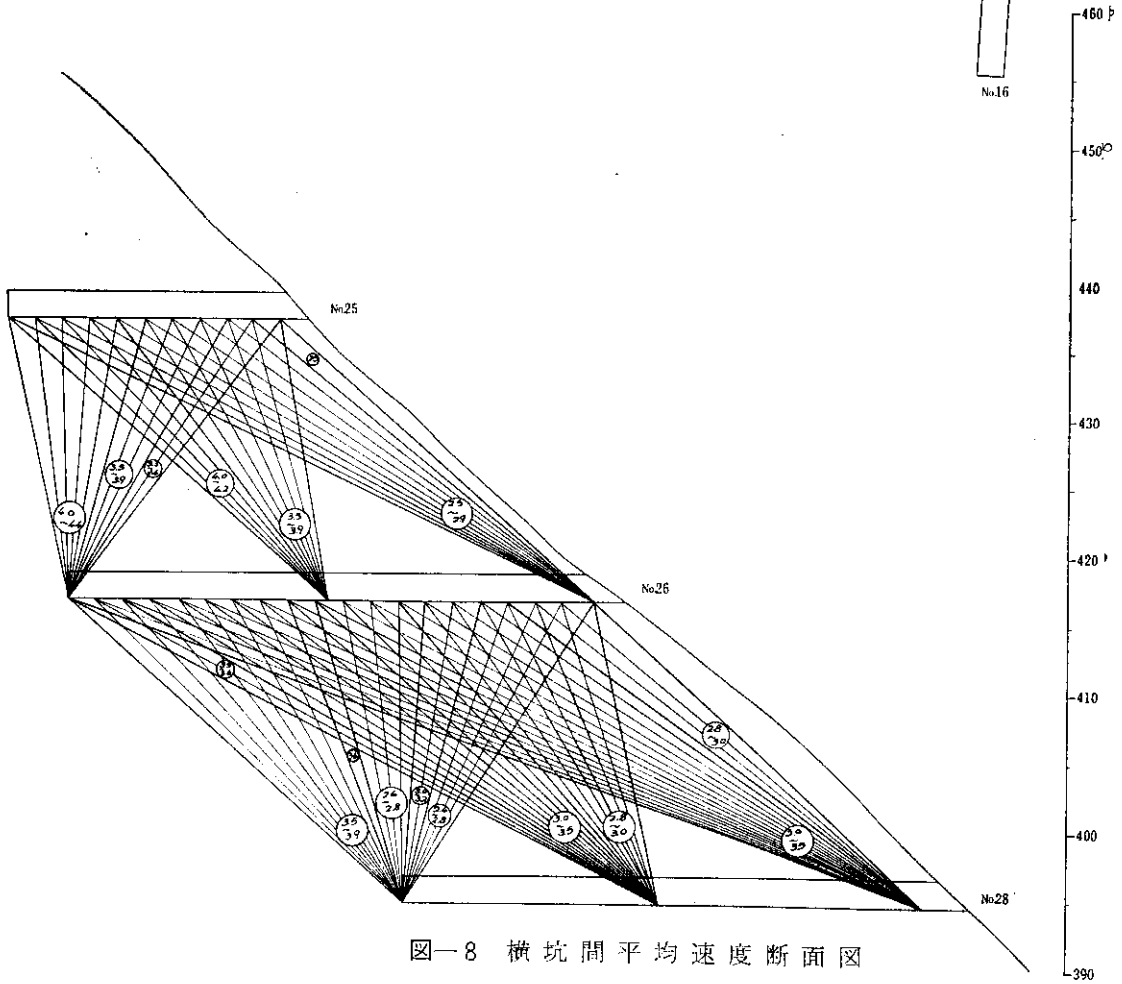


图-8 横坑間平均速度断面图

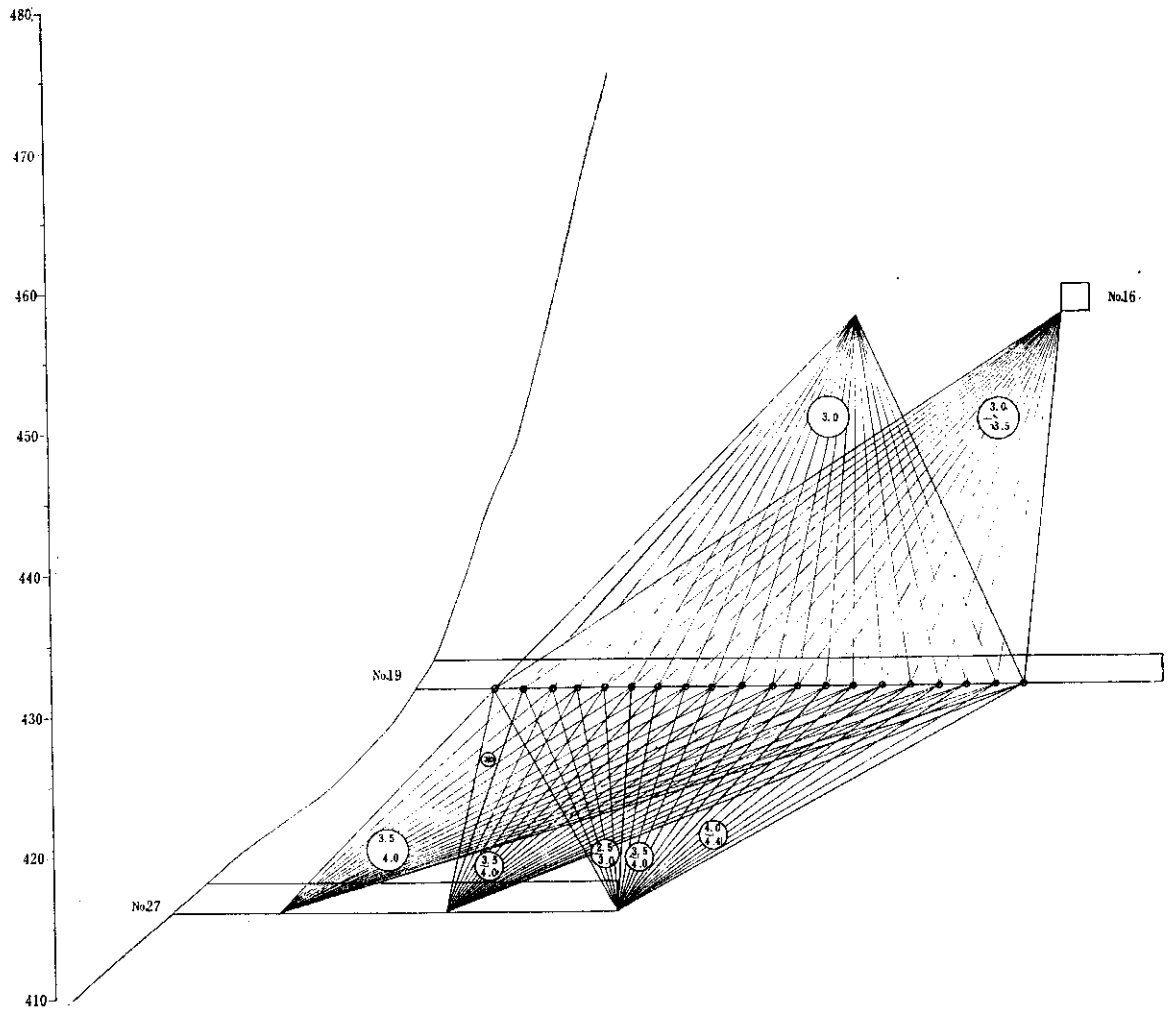


図-9 横坑間平均速度断面図

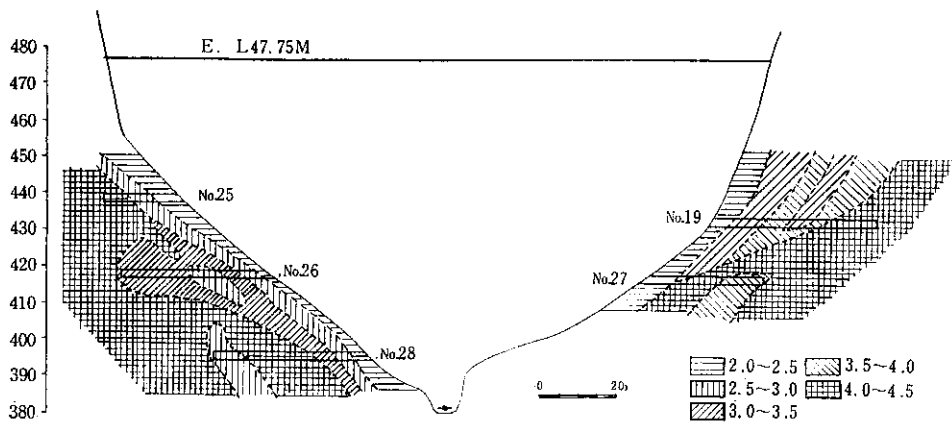


図-10 速度分布鉛直断面図

のようになる。岩盤の速度は、2.0~4.5km/secの範囲にあり、このうち2.5km/sec以下の速度の岩盤は風化岩、2.5km/sec以上の速度の岩盤は、新鮮岩盤と考えられる。

2) 速度分布図で見られるように当ダムサイトの岩盤は、一般に考えられるような地表から深くなるにつれ良質な岩盤が存在し、したがって速い速度層が分布するという状況にはなく、速度層の分布が複雑になっている。

これは当ダムサイトに分布する岩盤の岩相変化が不規則であるためと考えられる。

3) 2.5km/sec層以下の風化岩は、地表から水平方向に2~11mの厚さで分布するが標高が高くなるにつれて厚くなる傾向にある。

4) 当ダムサイトの岩盤は、地質調査の結果、4等級のタイプの岩相に分類され、また岩相および亀裂、節理

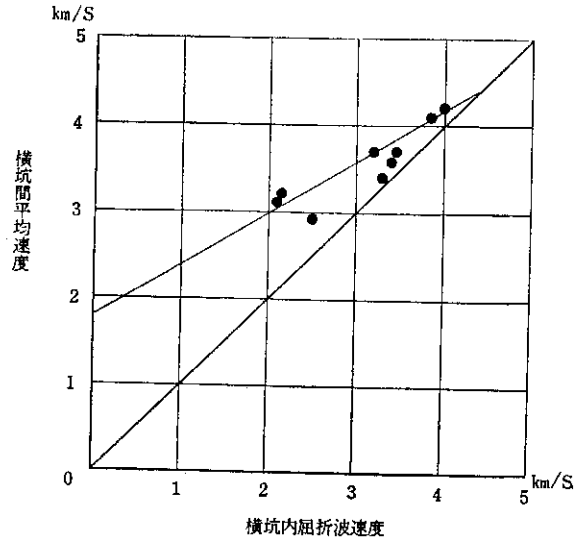
の状況によりⅠ～Ⅳ級の等級分類がなされているが、等級分類と速度分布とは、概してよく一致し、その関係は表一1のようになる。

表一1

等級	評価	弾性波速度 (km/sec)
Ⅰ	良好	4.0～4.5
Ⅱ	やや良好	3.5～4.0
Ⅲ	普通	2.5～3.5
Ⅳ	不良	2.5以下

5) 地表から行なった地震探査の結果では、2.5km/sec層と、4.0 km/sec層の2層の速度層からなっているが、速度分布図と比べてみると、表層部の2.5km/sec層については傾向が一致するが、深部については、まったく違っている。これは、当ダムサイトの岩盤の岩相変化（速度分布）が不規則で、かつ著しいためである。このような岩盤の的確な速度分布を知るには、地表から行なう地震探査では非常に困難であると考えられる。

6) 横坑間平均速度法による速度は、横坑内屈折波法による速度よりも大きな速度値を示し、図一11のように速度が速くなるにつれその差は小さくなり4.2km/sec程度になると両者の速度値がほとんど等しくなるようである。なお、4.0km/sec以下の速度での両者の関係は $y = 0.57x + 1.79$ (y : 横坑間平均速度, x : 横坑内屈折波



図一11 横坑間速度横坑内速度関係図

速度)となる。

7) 本測定は、ダムサイト中心線上のみで行なった結果であるが、この測定区域に見られるような複雑な岩相（速度層）の分布は当ダムサイト全域について見られるもので、地表下かなり深い部分においても比較的低速度を示す岩相は存在していることは明らかであり、深い掘削によって必ずしも良好岩に達するような単純な地質構造を示してはいない。したがって基礎掘削にあたっては、この点を考慮のうえ比較的低速度層（2.5km/sec程度）でとどめることもやむを得ないことと考えられる。