

屈折法地震探査の今昔物語

吉田 壽壽¹⁾

1) 日本物理探査株式会社 社友

1. はじめに

渡邊貫理学博士は、1935年に古今書院の地学辞典を発行し、地学の普及に勤めた人であり、そしてまた1942年には日本物理探査株式会社を創立し、社長として事業を始めた人物である。私は、1946年に入社し、入社してからの15年間に調査した箇所は、北海道から沖縄まで160箇所、東南アジア数カ所におよび、机に向かっての仕事よりも山や谷を歩きまわる仕事の方が多くあった。現場作業や解析業務について、懇切な指導をしていただいた。今は亡き上司を偲びつつ、当時を思い出しながらの昔話に、しばしお付き合いをお願いしたい。

2. ハギトリ法について

1938年萩原尊禮先生は、屈折波走時曲線から直接基盤の速度を求める"萩原の方法"を考案された。これは、低速度の表土層の厚さの変化により走時曲線が凹凸を呈し、基盤の速度が求めにくいことから考案された解析法である。

私達は1948年に新潟県の小千谷で、発電用の調整池建設のため、田圃上で屈折波探査を行った。調査結果の解析につきましては、表俊一郎先生から"萩原の方法"の解析について教えていただいた。

この方法は、走時曲線の足し算や引き算で若干手間取ったが、私より2年後輩の新入社員宮川善宏君が走時曲線の中点をデバイダーでとり、全走時の1/2との差を各走時から引けばと提案した。その後、上司の服部保正氏が両走時曲線の中点の値をそのまま全走時の1/2の線上に上下すればよいとして、解析作業が簡便に進められるようになった。本来このハギトリ法は地形も平坦な場所に適用されていたが、地形も山型で起伏のある所にも適用され、それなりの理論のもとで今日まで適用されている。

3. 屈折法探査のための発破振動と地震動について

屈折法探査では、振動源として、火薬を使用するため、地主さんの承諾を必要とする。しかし地震探査というと、地主さんは私が承諾したため地震が発生するのでは、近所の人から文句がでると

言われ、説得に時間がかかった。そこで私達のやるような地震探査は弾性波探査と呼ぶようになり、地元への説得も容易になった。

いまここで、地震動と発破振動について考えてみる。

振動による被害は、地震のときは加速度との対比で論じられるのが一般的ですが、発破振動の場合は変位速度の大きさを検討するのが普通である。これは、地震動に比べて発破振動の卓越周波数が高いからで、一般的に地震の卓越周波数は1~10Hzですが、発破振動の場合は50~100Hzである。このため、地震動と発破振動では、建物等への影響がちがう。

いま、振動が正弦波で表されるとして、変位の時間変化を y 、角振動数 ω 、 f を周波数として、 $\omega=2\pi f$ 、時間を t 、変位の最大値を A とすれば、 $y=A \cdot \sin(\omega \cdot t)$ なので、速度 v および加速度 α は上式を1回および2回微分して、速度および加速度を求めると次式となる。

$$v = \frac{dy}{dt} = A \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) = A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \cos(\omega t)$$

$$\alpha = \frac{d}{dt} \frac{dy}{dt} = -A \cdot 2\pi \cdot f \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) = -A(2\pi f)^2$$

$$\sin(\omega t)$$

また、これらの最大値は

$$y_{\max} = A, \quad v_{\max} = 2\pi f A, \quad \alpha_{\max} = (2\pi f)^2 A$$

であるから、

$$v = 2\pi f A = \frac{2}{(2f)^2} \frac{f}{2f} = \frac{1}{2f} \quad A = \frac{v}{(2f)^2}$$

となる。

ここで、震度4の中震に相当する加速度70galの場合、地震の周波数を5Hz、発破振動の周波数を100Hzとして、振動を図3.1に示すような正弦波で表されるとした場合、上述した α 、 f を既

知として, v, A を求めて, その結果を表 3.1 に示す.

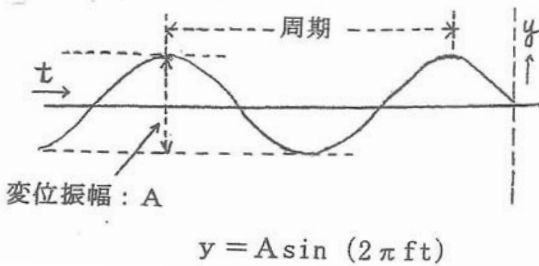


図 3.1 正弦波の振動成分

地震の場合

$$v = \frac{70}{2 \cdot f} = \frac{70}{2 \times 3.14 \times 5} = 2.23 \text{ cm/sec}$$

$$A = \frac{70}{(2 \cdot f)^2} = \frac{70}{(2 \times 3.14 \times 5)^2} = 0.071 \text{ cm}$$

発破の場合

$$v = \frac{70}{2 \cdot f} = \frac{70}{2 \times 3.14 \times 100} = 0.11 \text{ cm/sec}$$

$$A = \frac{70}{(2 \cdot f)^2} = \frac{70}{(2 \times 3.14 \times 100)^2} = 0.00018 \text{ cm}$$

である.

表 3.1 発破振動と地震動の比較

種別	地震動	発破振動
変位加速度 α (gal)	70 (震度4)	70
周波数 f (Hz)	5	100
変位速度 v (cm/sec)	2.23	0.11
変位 A (cm)	0.071	0.00018

表 3.1 から地震動で 70gal の場合の変位速度および変位が判明し, 70gal の中震の場合, 建物への影響は考えられるが, 同じ変位加速度を示していても, 発破振動の場合は, 周波数が大きいいため建物への影響は生じないことが分かる.

4. トンネル掘削によるゆるみ領域

4.1 切羽速度

弾性波速度 5km/s の岩盤内を掘削中に, 切羽で

速度測定をしたところ 1 km/s の速度であるため, 施工パターンの変更を要求され, 発注者は測定した私どもに検討を依頼した. 切羽面では最大でも 10m 程度しか測定できず, ハンマーのたたき力に達する距離はせいぜい 5~6m 程度であるためにそのような結果になったことを説明して諒解を得たことがある.

4.2 トンネル内弾性波速度測定

(1) 切羽面での速度測定

図 4.1 に示すように切羽面の一端をハンマーでたたき, 受振器 1~2 個を切羽面に密着させて振動の到達時間を測定し, 図 4.1 の中段に示すように, 起振点からの速度を求めている. 例えば地表弾性波探査で, その地点が 5.0km/s の岩盤内にあった場合, 切羽面では 0.8~1.3km/s とまちまちな値であり 5.0km/s の値を下廻っているということで, 岩質が悪いと判断している.

しかし, 測定された走時をそれぞれの位置にプロットして走時曲線を書いてみると図 4.1 の下段のようになる. 現場でこのような計算をすることは面倒であり, たとえ計算したとしても, 5.0km/s までの深さが判明しない限り地山全体が悪いのかどうかは判定できない. また, 切羽面では, 最大でも 10m 程度しか測定できず, ハンマーのたたき方にもよるが, 振動の到達距離はせいぜい 5~6m 程度である.

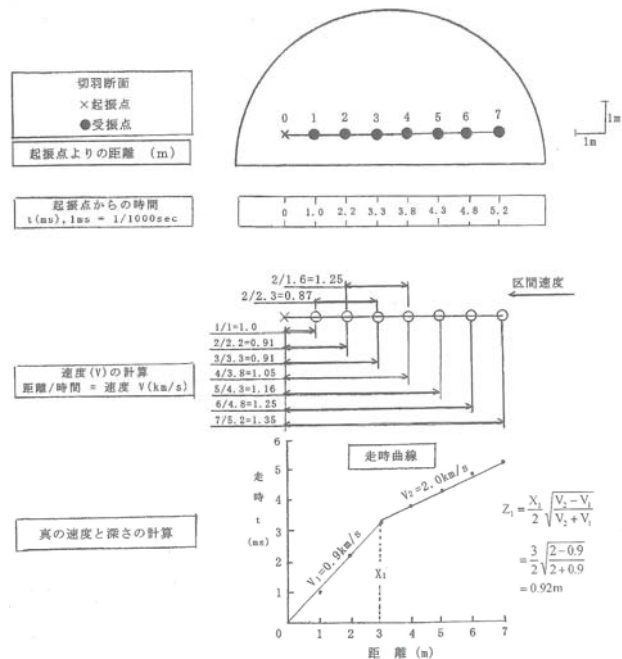
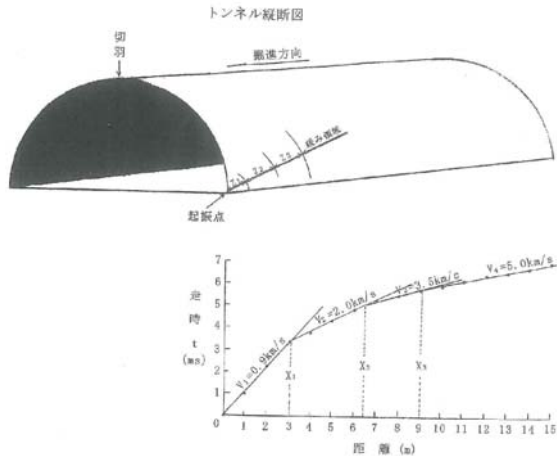


図 4.1 切羽面での速度測定

(2)トンネル側面速度測定



$$- 1.52 \frac{3.5\sqrt{5^2 - 2^2} - 5\sqrt{3.5^2 - 2^2}}{2\sqrt{5^2 - 3.5^2}} = 1.45\text{m}$$

図 4.2 トンネル側面に沿った速度測定

図 4.2 の上段に示すように切羽から掘削区間の側壁に沿って、切羽(距離 0)で少量の火薬を使って起振源とし、地表で使う器械で 15 個の受振器を使って振動の記録をとり、走時曲線を作成して図 4.2 の下段に示すような走時曲線が得られたとする。

このように、測定の長さを長く、起振力を強くして測定すれば地山速度 5.0km/s までの状況が把握される。場合によっては、岩盤速度が 3.0km/s で破碎質であることも分かる。

ゆるみ深さの計算式

$$Z_1 = \frac{X_1}{2} \sqrt{\frac{V_2 - V_1}{V_2 + V_1}} = \frac{3}{2} \sqrt{\frac{2 - 0.9}{2 + 0.9}} = 0.92\text{m}$$

$$Z_2 = \frac{X_2}{2} \sqrt{\frac{V_3 - V_2}{V_3 + V_2}}$$

$$- Z_1 \frac{V_2 \sqrt{V_3^2 - V_1^2} - V_3 \sqrt{V_2^2 - V_1^2}}{V_1 \sqrt{V_3^2 - V_2^2}}$$

$$= \frac{6.5}{2} \sqrt{\frac{3.5 - 2}{3.5 + 2}}$$

$$- 0.92 \frac{2\sqrt{3.5^2 - 0.9^2} - 3.5\sqrt{2^2 - 0.9^2}}{0.9\sqrt{3.5^2 - 2^2}} = 1.52\text{m}$$

Z3=

$$\frac{X_3}{2} \sqrt{\frac{V_4 - V_3}{V_4 + V_3}} - Z_1 \frac{V_3 \sqrt{V_4^2 - V_1^2} - V_4 \sqrt{V_3^2 - V_1^2}}{V_1 \sqrt{V_4^2 - V_3^2}}$$

$$- Z_2 \frac{V_3 \sqrt{V_4^2 - V_2^2} - V_4 \sqrt{V_3^2 - V_2^2}}{V_2 \sqrt{V_4^2 - V_3^2}}$$

$$= \frac{9}{2} \sqrt{\frac{5 - 3.5}{5 + 3.5}}$$

$$- 0.92 \frac{3.5\sqrt{5^2 - 0.9^2} - 5\sqrt{3.5^2 - 0.9^2}}{0.9\sqrt{5^2 - 3.5^2}}$$

4.3 割れ目と速度

4.3.1 速度変化の原因

中・硬質の地山におけるトンネル坑内での速度値が 1~2km/s であるということは、主として岩石に発達する割れ目と含水状態に起因するものと考えられる。

大見,他(1977)は、孔隙率の小さい硬岩でも、乾燥状態と含水飽和状態では、P波速度の変化が著しいものがあることを認め、走査型電子顕微鏡を用いて岩石の孔隙構造を観察した。その結果速度変化の著しい岩石は、いずれも微細なクラック状孔隙を多く含んでいることをつきとめた。本荘,他(1979)によれば、新高瀬川地下発電所掘削に伴う内空周辺の弾性波速度の変化を調べた結果、掘削前の速度値は 4.53±0.41km/s であったが、掘削後の発電所周辺の岩盤(おおむね 20~30m 範囲)の中で平均 10~20%、最大 30%程度の変化が見られたと報告され、その原因として岩盤内を予め掘削されていたボーリング孔内でのポアホールテレビジョンによる節理間隙測定結果から岩盤の変形量はおおむねその区間の節理間隙の増大値に対応しているとしている。そして新高瀬川地下発電所に分布する花崗閃緑岩のような塊状堅硬でかつ節理を有する岩盤中の弾性波速度については Crack Porosity モデルが最も実態に即したものとした。以上述べた大見他(1977)、本荘他(1979)によるものは、いずれもクラックポロシテイモデルによるものであるが、計算手法に若干の相異があるので、それぞれの手法によって計算した結果を示した。

4.3.2 クラック状孔隙による速度変化の計算

(1)Walsh の式による方法

クラック状の孔隙すなわち回転楕円体の孔隙を含む速度の計算にあたっては、Walsh(1968、

1969)の式を用いた。いま、体積弾性率 K , K_s , K_w , K_f はそれぞれ、岩石全体, マトリックス, 水, および間隙内の含有物を示し, 剛性率 G , 密度 ρ も同じ添字をもって表し間隙率を ϕ とする。

$$\frac{K_s}{K} - 1 = -\frac{1}{3} \left[\frac{K_s - K_f}{K_s} \right] T_{ijj}$$

$$\frac{G_s}{G} - 1 = -\frac{1}{5} \left[\frac{G_s - G_f}{G_s} \right] \left(T_{ijj} - \frac{1}{3} T_{ijj} \right)$$

T_{ijj} および T_{ijj} は次のとおりである。

$$T_{ijj} = \frac{3(3K_s + 4G_f)}{3K_f + 4G_f + 3 G_s \left[\frac{3K_s + G_s}{3K_s + 4G_s} \right]}$$

$$T_{ijj} = 1 + \frac{8G_s}{4G_f + 3 G_s \left[\frac{3K_s + 2G_s}{3K_s + 4G_s} \right]} + \frac{2(3K_f + 2G_f) + 3K_s + 4G_s}{3K_f + 4G_f + 3 G_s \left[\frac{3K_s + G_s}{3K_s + 4G_s} \right]}$$

ここでは, α は aspect ratio (孔隙の縦横比) である。縦波の速度 V_p は次式で表される。

$$V_p = \sqrt{\frac{K + (4/3)G}{\rho}}$$

$$\rho = (1 - \phi)\rho_s + \phi\rho_f$$

ここで,

$$K_s = 4.4 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$K_w = 2.2 \times 10^6 \text{ kN/m}^2$$

$$K_a = 1.5 \times 10^2 \text{ kN/m}^2$$

$$G_s = 3.7 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$G_w = G_a = 0$$

$$\rho_s = 2.7 \text{ g/cm}^3$$

$$\rho_w = 1.0 \text{ g/cm}^3$$

として, $\alpha = 0.01, 0.0001$ とし, K_f/K_w をパラメータとして計算した結果を図 4.3 に示した。

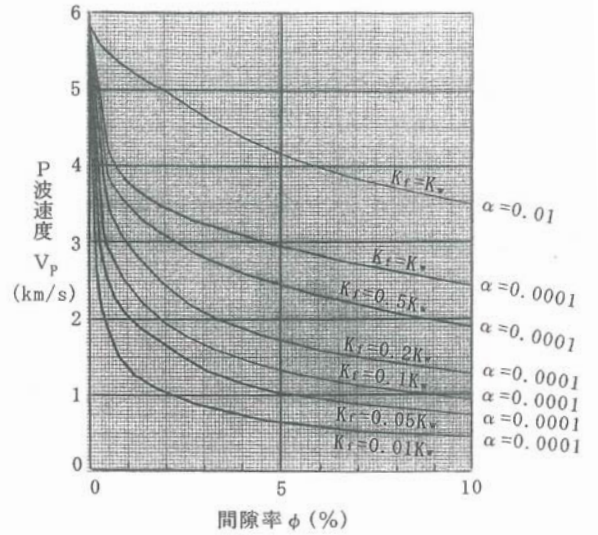


図 4.3 間隙率と P 波速度 (図中 α はアスペクト比を示す)

(2) 直列弾性係数による方法

本荘(1979)は, 新高瀨川発電所の地殻空洞掘削に伴う周辺岩盤のわずかな変形が比較的大きな弾性波速度変化をもたらす機構について, 次のような検討を行った。

その結果, 当発電所のように花崗閃緑岩よりなる塊状, 堅硬で節理を有する岩盤では, 物質中に多数の扁平な回転楕円体の異種物質, たとえば孔隙が分布している場合の弾性係数を求めるものであり, この回転楕円体の形状を無限に扁平と考えた極限が岩盤中の節理の分布を模式化するものと考え, 次に示す式を提案している。

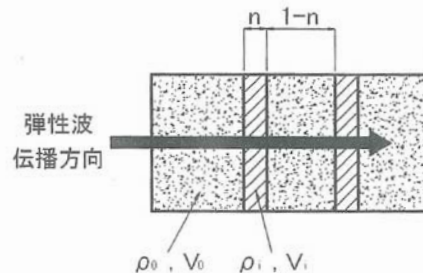


図 4.4 弾性波速度変化のモデル

すなわち, 図 4.4 に示すように, 構成岩石及び節理間隙充填物質 (水, 空気, その他) の密度 (P 波速度) をそれぞれ ρ_0, V_0 および ρ_i, V_i とし, 間隙が全体に占める割合を n とすると

$$\frac{1}{V^2} = \frac{n}{V_i^2} + \frac{1-n}{V_0^2}$$

で表される。この式は力学模型として直列弾性係数に相当するものであるが、Crack Porosity モデルにおいて孔隙の形状を無限に扁平した極限とも一致すると述べている。

ここで、 V_i で計算に用いた値により計算してみる。

$$\rho_0 = 2.7\text{g/cm}^3 \quad K_w = 2.2 \times 10^6 \text{kN/m}^2$$

$$V_0 = 5.86\text{km/s} \quad \rho = (1 - n)\rho_0 + n\rho_i$$

また、

$$V_i = \sqrt{\frac{K_i}{\rho_i}} \quad \text{ゆえに} \quad K_i = \rho_i V_i^2$$

であるから K_i/K_w をパラメータとして計算した結果を図 4.5 に示した。

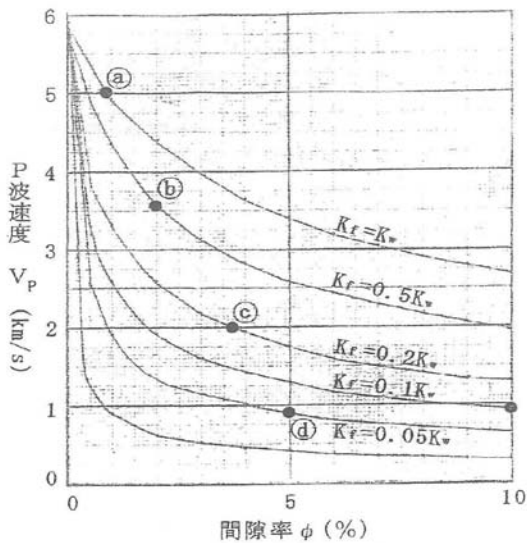


図 4.5 トンネル内 (図 4.2) 速度の解釈

図 4.5 に、図 4.2 で得られたトンネル内速度値 V を入れて、a, b, c, d の記号をつけてみた。

a: $V_4 = 5.0\text{km/s}$ b: $V_3 = 3.5\text{km/s}$ $Z_3 = 1.45\text{m}$

c: $V_2 = 2.0\text{km/s}$ $Z_2 = 1.52\text{m}$ d: $V_1 = 0.9\text{km/s}$

$Z_1 = 0.92\text{m}$

図 4.4 において、 $K_f = K_w$ は間隙が水で飽和されている場合、 $K_f = 0.5K_w$ は間隙が水と空気よりなる場合である。ここで、 5.0km/s の地山は間隙率 0.8% で間隙は水で飽和されている状態として a の位置にあるとする。この地山がトンネル掘削により、孔奥から切羽にかけて次第に割れ目も多くなり、割れ目には空気も多く含まれるようになると b, c, d となって切羽となると考えられる。このうち d の速度 0.9km/s で厚さ 0.9m の層は発破掘削による損傷域と考えられる。また、速度 2.0km/s と 3.5km/s のそれぞれ厚さ 1.52m 、 1.45m はトンネル掘削に伴うゆるみ領域であって、その厚さからみても弾性領域にあるゆるみ量と想定される。なお、TBM 機械掘削領域では d の速度 0.9km/s のような低速度帯は検出されない。

5. 自然地震動の屈折波解析

人工地震による大深度地下構造調査としては、国際地球内部開発(Upper Mantle Project)による地質構造解析部門として東北大学の依頼により、1966~1967 年に実施した岩手県の焼石岳および宮城県の白石地区がある。これらは何れも測線長 10km 程度で測線両端および測線内の数点に起振点を設けた。その結果は焼石岳では、古生層や花崗岩の露出地域であり、第 1 層 5.0km/s の下位約 1000m が 6.0km/s 、白石地区では、第三記層である第 1 層が 3.2km/s その下位約 1200m が 5.5km/s であった。このように測線長 10km 程度では基盤岩の速度は $5.5\sim 6.0\text{km/s}$ であった。次に、1995 年 1 月 17 日に発生した兵庫県南部地震について、気象庁の地震月報(平成 7 年 1 月発行)により、日本国内の観測地点で得られた p 波到達時間と、震源からの距離から図 5.1 に示す走時曲線を作成した。ここで、震源の深さ H は、3 地点以上の観測点より求められ $H = 16\text{km} \pm 2\text{km}$ とされている。

なお、受震器の設置してあるところは、 6.0km/s より小さい速度層が分布するとして、深度 5km までは 3.0km/s と仮定して計算すると深度は 36km となった。速度 6km/s と 8km/s の境界は、モホ面と称され内陸で深く、太平洋・日本海では浅くなっているといわれている。

また、斉藤正徳先生に、この走時曲線を見ていただいたところ、この走時曲線は気象庁(1990 年)の市川・望月の走時表で、震源の深さ 20km で距離 1500km までの走時と一致しており、この走時表は jeffreys-Bullen を日本向けに改訂したもので、モホ面で $V_p = 7.95\text{km/s}$ になっているとのことである。

さらに、表俊一郎先生には気象庁の時計の精度が格段に良くなったので、観測値のバラツキが非常に少ないと言われた。毎熊輝記先生は、早稲田大学の学生にどのような走時解析をするか検討するように指示されたと同っている。

6. おわりに

本文は、私が作業中の出来事について検討した結果と、 1500km にわたり観測されている兵庫県南部地震についての走時曲線について私なりの検討を試みたものである。

7. 謝辞

各項目について、ご指導いただいた方々に深く感謝いたします。

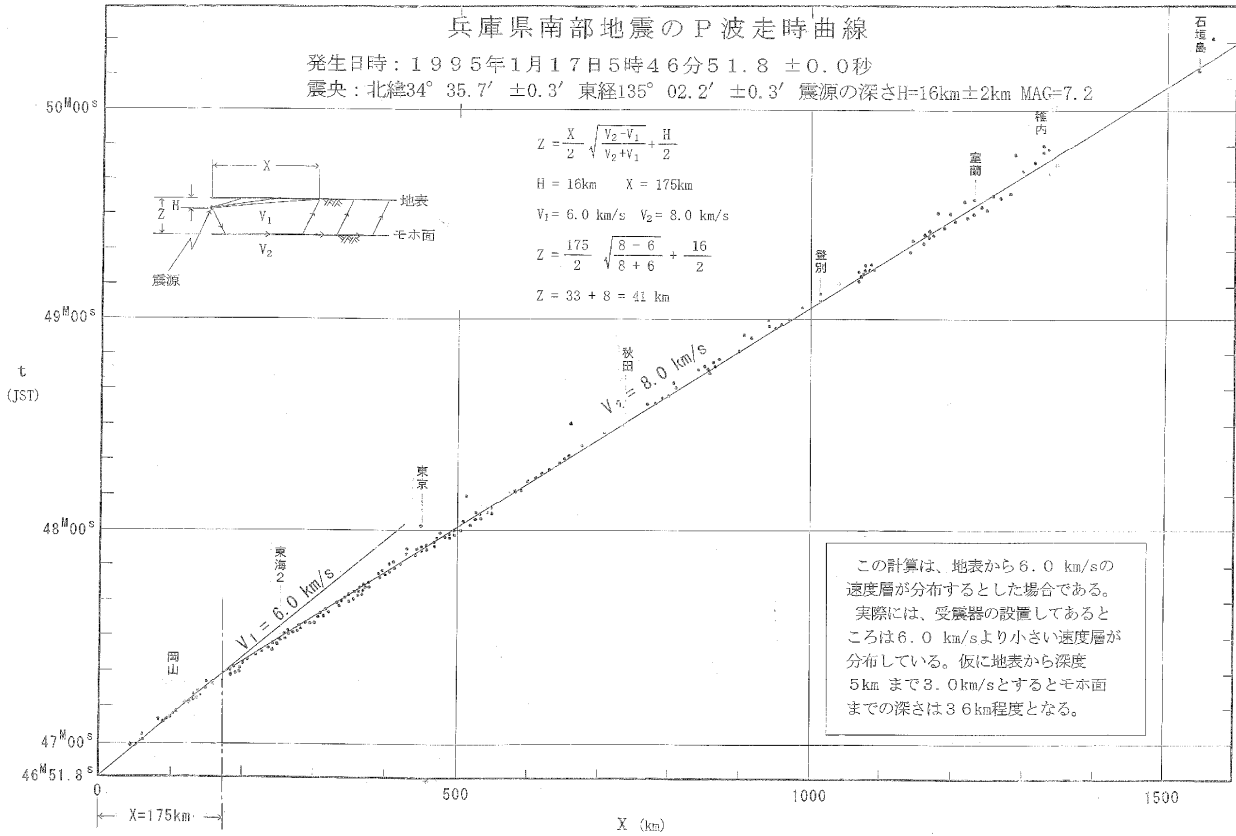


図 5.1 兵庫県南部地震のP波走時曲線

参考文献

- 1) 萩原尊禮, 1938, 基盤面の傾斜が一樣でない場合走時曲線解析法, 地震, 10, 463
- 2) 服部保正, 1952, 講座 弾性波探査法(屈折波走時曲線解析法の原理), 地質工学, 第3集, 64-1
- 3) 本莊静光, 本島勲, 1979, 新高瀬川発電所の地下空洞空洞掘削に伴う周辺岩盤の弾性波測度測定, 電力研究所報告, No.38, 14-15
- 4) 市川政治, 望月英志, 1971, 近地地震用走時表について, 気象研究所研究報告, 22, 229-290
- 5) J.B.Walsh, 1968, Attenuation in partially melted material, J.G.R.Vol.73, No.6, 2209~2216.
- 6) J.B.Walsh, 1969, New analysis of attenuation in partially melted rock, J.G.R.Vol.74, No.17, 4333-4337.
- 7) 気象庁, 1997, 地震月報, 平成7年1月, 82-83
- 8) 大見美智人, 岡三治生, 井上正康, 1977, 吸水による岩石中の弾性波伝播速度の変化(第3報)孔隙の形状が縦波伝播速度に及ぼす効果について, 物理探査, Vol.30, No6, 1~9
- 9) 力武常次, 1997, 地球科学ハンドブック, 聖文社, 52-55
- 10) 渡邊貫, 1952, 地質工学発刊の辞, 第1集, 1
- 11) 吉田壽壽, 1976, 不規則な地下構造の解析法についての研究, 地質工学, 第10集, 163-176
- 12) 吉田壽壽, 2010, 山岳トンネル地質調査としての弾性波探査の適用, 物理探査, 63-4, 306-308