

弾性波探査によるトンネル掘削後の緩み領域の推定

神谷 宏* 長谷部 広行**

角田 伸二*** 岡田 隆治****

要 約

この報告は、北越北線鍋立山トンネルにおいて、弾性波探査によるトンネル掘削後の緩み領域について推定したものである。対象とした地山は膨張性泥岩で水に大変弱く、また空気乾湿によっても変化する地質である。測定は屈折波法と速度検層法の2方法を用いて実施した。

その結果、屈折波法では縦断面的に緩み領域が2～6 m程度に、また速度検層では横断面的に3～4 m程度の範囲に発生したものと推定される。しかしこの緩み領域は地山の弾性波速度が極端に小さく変化したわけではなく、掘削後の時間の経過と共に漸次深さ方向へ進行してゆくため、現場の施工状況および地質調査とを合せて検討する必要がある。

目 次

- § 1. 目 的
- § 2. 地質概要
- § 3. 地山の変状
- § 4. 測定方法
- § 5. 解析方法
- § 6. 緩み領域の推定
- § 7. あとがき

§ 1. 目 的

膨張性泥岩におけるトンネル掘削後の周辺地山の挙動については、最近多数の研究・調査の成果が発表されている。しかし緩み領域に関する実測例についてはわずかなのである。そこで松代出張所の協力を得て、鍋立山トンネル坑内において、弾性波探査による緩み領域の調査を実施した。

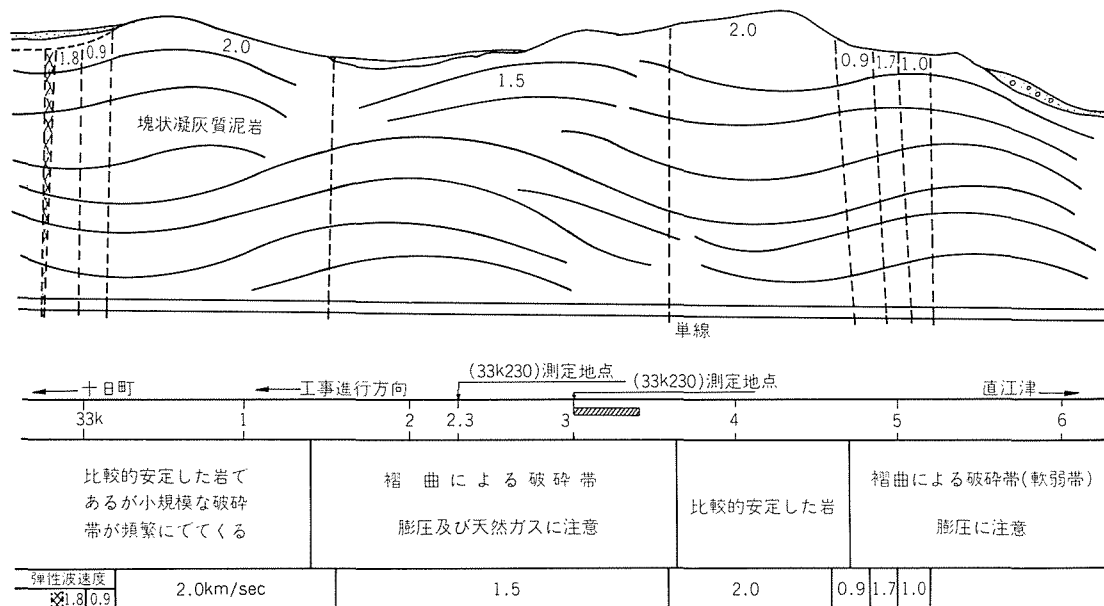


図-1 地山の状態

* 技術研究所係長
 ** 技術研究所
 *** 技術研究所
 **** 技術研究所

§ 2. 地質概要

北越北線は上越線六日町と信越本線直江津駅を結ぶ短

絡線で、魚沼丘陵・信濃川・東頸城丘陵そして高田平野を通る計画で着工されている。鍋立山トンネルは東頸城丘陵の信濃川寄りに位置している。山全体は新第三紀の鮮新世に属する西山層・椎谷層・寺泊層と云われている泥岩と、これらの層の上に堆積する第四紀更新世の沖積層から成っている。この丘陵は長年の間多大な褶曲作用を受けた起伏の険しい地形となっている。

今回の測定地付近の地山の状態は図-1に示す通りである。測定場所はS T A 33 K 320 mおよび33 K 230 mの2ヵ所であるが、工区内でも特に地質状態が悪く、褶曲作用による破砕帯が数多く存在しており、しかも可燃性ガスの発生しやすい所である。地肌をよく観察してみると泥岩は褶曲作用と共に薄い片状を形成し、縦横に細い節理が入っており、この節理が自然に拡大し、岩塊を細片化させ膨張圧を発生させている。(写-1)



写真-1 切羽の地質状況

§ 3 . 地山の変状

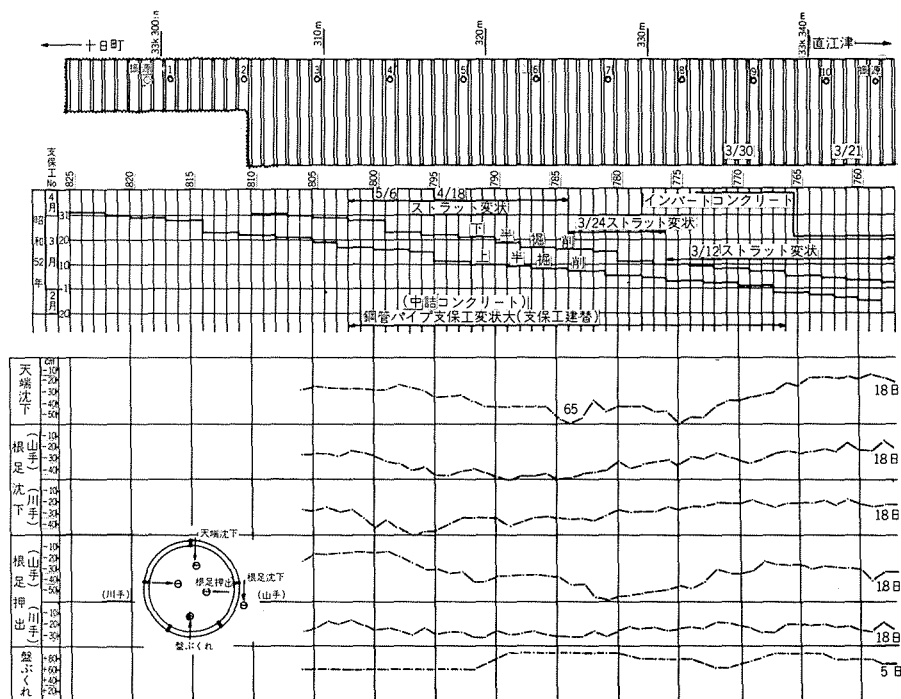
掘削後の測定地点付近の地山の変状について、現場測定結果をもとに若干述べることにする。

S T A 33 K 900 mから十日町側へ600 mを切羽の自立性を考慮して、上下半分分割するショートベンチ工法で施工している。上半ベンチ長は15 mであり、閉合時期は上半掘削後5～8日である。膨張圧が直ちに発生し崩壊する可能性があることから、掘削完了後に鋼管支保工(ϕ 216 mm)を建込み、鋼管内にモルタルを注入し、木矢板で逢い地を行う。その後、ロックボルトを打込み、金網(6 mm目-150×150角溶接金網)を張り固定し、最後に吹付コンクリートを打設して仮巻きを終える(写-2)。

掘削後のこれら一連の作業は1日で完了する工程となっている。仮巻き完了後、5～8日経て上下半支保工が閉合され、その後ストラットが挿入される。インバート



写真-2 仮巻き支保工



コンクリートは下半の切羽より30m離れて打設され、覆工コンクリートは約100m離れ、掘削後約40日経過してから打設されている。

仮巻きを完了した後の支保工の変状についての計測結果は図-2に示す通りである。この変状計測は全工区にわたって実施されているが、ここでは弾性波探査を実施した33K300m～33K340m区間について掲げている。

それによると、上下半閉合時に挿入したストラットはほとんど湾曲し後日取替えている。鋼管支保工の変状は天端沈下・根足沈下・根足押出そして盤ぶくれの4点について示されている。

この変状曲線は変状が落ち着いた時点ということで、盤ぶくれについては5日後、その他は18日後の測定値を結んである。特に変状として大きい挙動が見られる測点No.4～8区間において盤ぶくれと天端沈下量を比較してみる。前者は同じ値が連続しているが後者は増えており、最大沈下はNo.6～7の間で生じ、その値は65cmとなっている。根足沈下と根足押出については、共に山手側の変状が大きくなっている。特に根足押出ではこの傾向が顕著であり、川手側の変状に変化はみられず、一方山手側の変状はNo.7付近で最大を示している。これらの挙動を断面的に見るならば、川手側よりも山手側の方が、また、天端沈下よりも盤ぶくれの方が挙動が大きいといえる。

§ 4. 測定方法

弾性波探査にはいくつかの方法があるが、本測定に採

用した方法は、

- (1)トンネル縦断方向に一つの測線を設定する方法
- (2)ボーリング孔を利用する方法

の2種類である。

4-1 トンネル縦断方向に一つの測線を設定する方法

この測定概要を図-3に示すが、この方法の特徴はトンネル側壁部に任意なる測線を設定することにある。測線は上半部分の左右45度方向に設定し、山手（工事進行方向右側）をA測線、川手側（同左側）をB測線とした。全測定長は約40mとし、その間に測点を間隔4.4～4.7mで10ヵ所設置した。測点No.1およびNo.10から2m分離して振源を設け、この点に衝撃を与え、探査をおこなった。

この方法の場合、測定に設置するピックアップは直接地肌に密着させる必要があるために、仮巻きする際に測点を箱抜きし、直接地肌を露出させておいた。振源の衝撃方法には発破を使う方法とハンマー等を使用する方法がある。当トンネルにおいては大ハンマーを使い、直接地山に衝撃振動を与える方法を採用した。

4-2 ボーリング孔を利用する方法

この方法はトンネルの側壁から横断方向に任意の深さのボーリング孔（ $\phi 86\text{mm}$ ）を削削し、この中にピックアップを挿入して、任意の深度の弾性波速度を測定する。この測定概要を図-4に示す。そして孔の位置から円周方向約1m程離れた地点に地肌を露出させ、ここに角材

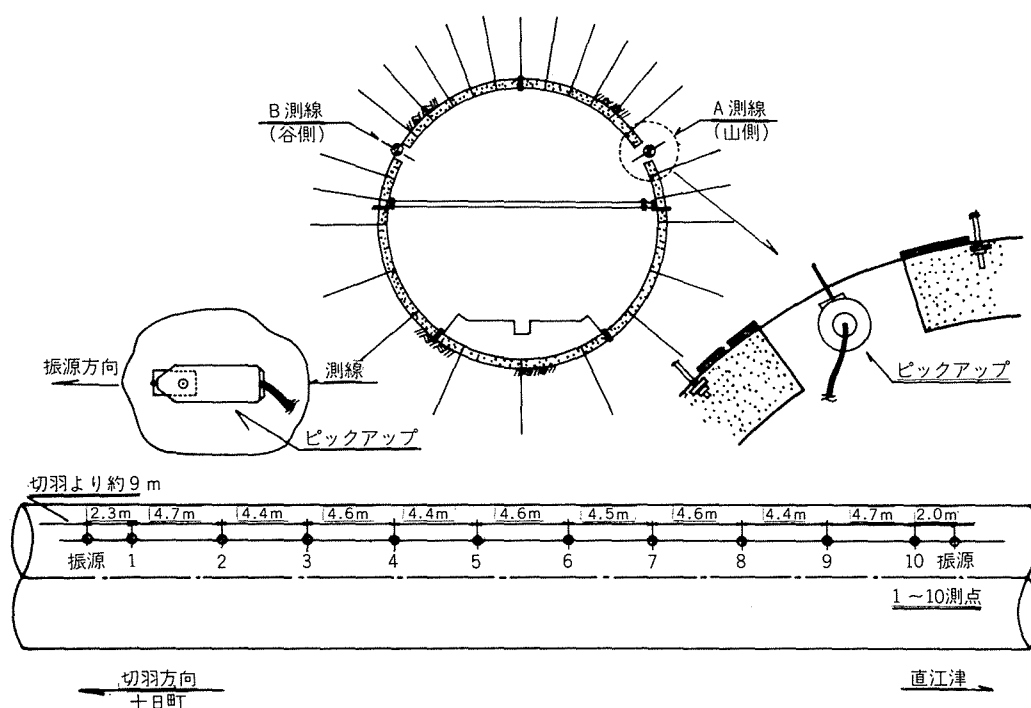


図-3 測定方法(1)の概要図

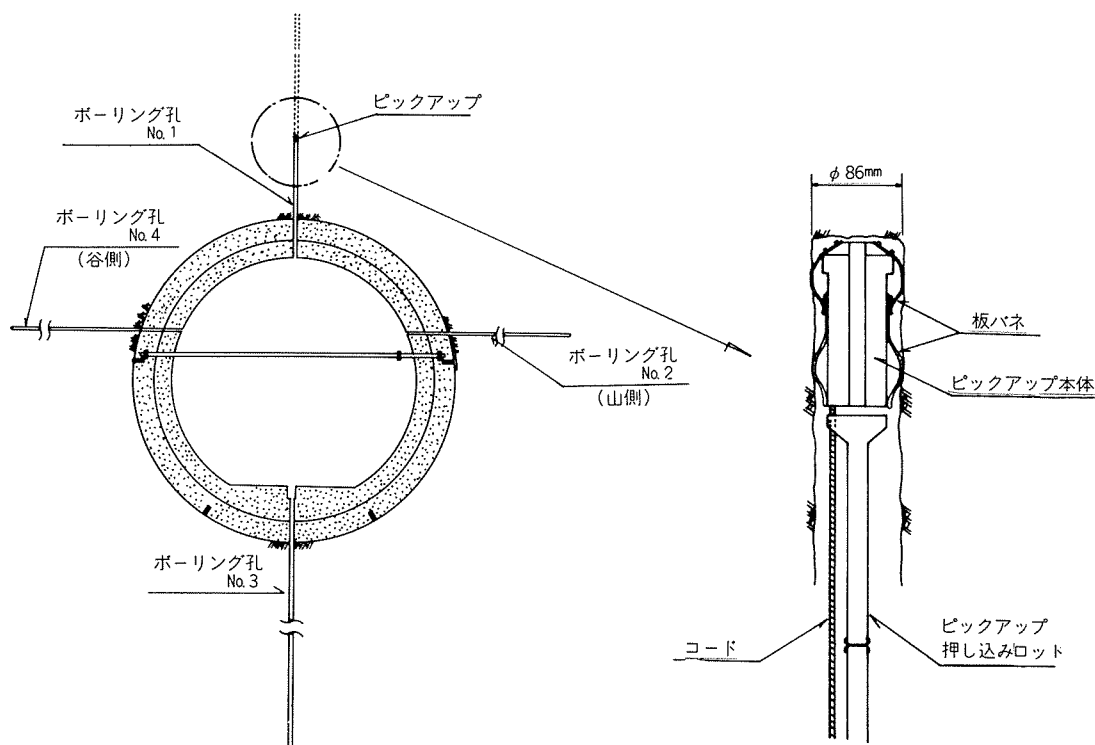


図-4 測定方法(2)の概要図

を置き大ハンマーで打撃し、衝撃振動を発生させた。

4-3 計測機器

表-1は測定に使用した機器類を示したものである。測定方法(1)と(2)で特に違う機器はピックアップであり、(1)の方法では多点用の地表面設置型を、(2)の方法では1点用の孔中固定型を使用している。

表-1 測定機器一覧表

測定方法	(1)の方法 (図-3)	(2)の方法 (図-4)
測定位置	STA33 K 300～ 33 K 340	STA33 K 230
実施	S 52.4.1～4.4	S 52.12.26～ S 53.2.16
検出器	GSC-11D (GEO SPACE) 固有振動数 4.5Hz	VP-3114(1 MV) 固有振動数 14.5Hz
増幅器	6 L 5 (三栄測器)	6 L 5 (三栄測器)
記録計	5 L 31 (三栄測器) 5 M 21 (三栄測器)	5 L 31 (三栄測器)
ショットマーク	測点No.1を利用	VM-1951(1 MV) VM-4200(1 MV)

§ 5. 解析方法

5-1 トンネル縦断方向に一つの測線を設定する方法

図-5に示すように地下に一つの水平層がある場合を

考えてみる。振源Aで発生した波動はそこから四方に伝播されるが、地表の測点に置かれたピックアップに感じられるものは、

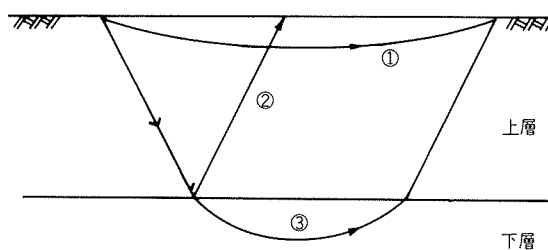


図-5 弾性波の種類

- ①直接波—地表付近を伝播してくる波
 - ②屈折波—下層に臨界角で屈折して任意の点から再び上層に戻る波
 - ③反射波—下層の上面で反射し地表に戻る波
- の3種類がある。

衝撃によって発生した振動は岩盤内を伝播し、壁面上のピックアップに受振され、振動の初動が記録される。この初動に要した時間(走時)を縦軸に、また振源から各測点までの距離を横軸にとってグラフを画くと図-6のようになる。これを走時曲線という。

いま地下の岩盤内を伝播する波の速度をV、振源から各測点までの距離をX、走時をTとすると、 $T=X/V$ である。この時この曲線は原点を通り、方向係数(傾き)は $1/V$ である。従ってこの直線より地下の岩盤内の伝播

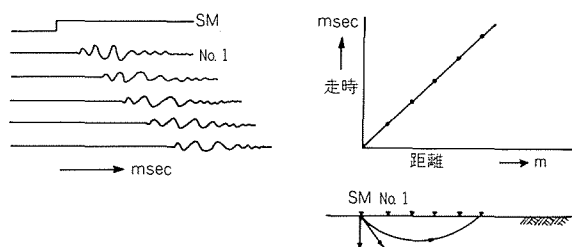


図-6 走時曲線

速度 V を知ることができる。図-7 は 2 層構造（上層・下層）の場合の走時曲線である。

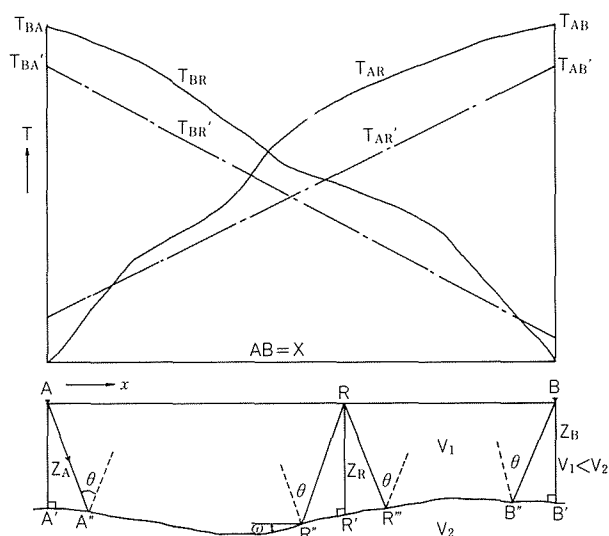


図-7 2層構造の走時曲線

緩み領域を推定するためには、この屈折波走時曲線を利用する。この屈折波走時曲線を解析する方法として一般的に広く利用されているものに表面除去法、即ち“荻原のはぎとり法”がある。この方法について以下簡単に説明する。

いま図-7 に示すように第 1 層目と第 2 層目とがほぼ水平で、あまり起伏がない場合を考える。A を出発した波のうち A' で臨界角 θ で下層に屈折した波は、ほぼ下層の上面に沿って進行し、任意の点 R' でやはり臨界角 θ で屈折して R に達する。

この走時を T_{AR} で表わせば、

$$T_{AR} = \frac{Z_A \cos \theta}{V_1} + \frac{Z_R \cos \theta}{V_1} + \frac{1}{V_2} \int_A^R \frac{1}{\cos \omega} dx$$

いま地層はほぼ水平と考えているので $\omega \doteq 0$, $\cos \omega = 1$ と見なしてよい。従って、

$$T_{AR} = \frac{Z_A \cos \theta}{V_1} + \frac{Z_R \cos \theta}{V_1} + \frac{x}{V_2}$$

となり、同様に、

$$T_{BR} = \frac{Z_B \cos \theta}{V_1} + \frac{Z_R \cos \theta}{V_1} + \frac{X-x}{V_2}$$

ここに $X=AB$ とする。A から B までの走時 T_{AB} と、B から A までの走時 T_{BA} は等しく、

$$T_{AB} = T_{BA} = \frac{Z_A \cos \theta}{V_1} + \frac{Z_B \cos \theta}{V_1} + \frac{X}{V_2}$$

である。ここで $Y = T_{AR} + T_{BR} - T_{AB}$ という量を考えると $Y = 2Z_R \cos \theta / V_1$ である。次に $T_{AR}' = T_{AR} - Y/Z$,

$T_{BR}' = T_{BR} - Y/Z$ というものを導入すれば、

$$T_{AR}' = Z_A \cos \theta / V_1 + x / V_2,$$

$T_{BR}' = Z_B \cos \theta / V_1 + (X-x) / V_2$ となり、これらの直線は共に $1/V_2$ という方向係数（傾き）をもつ一種の走時曲線である。この傾きより第 2 層目の速度 V_2 を求めることができる。これを速度走時曲線といい簡単に T' 曲線ともいう。

観測された走時曲線（ T 曲線）から T' 曲線を作成するには、 T_{AB} を 2 等分した点で X 軸に平行線を引き、各々の受振点ごとに $(T_{AR} - T_{BR}) / 2$ を比例コンパスでとって平行線の上下にプロットして、それらの点を結べばよい。次に $T_{AR} - T_{AR}'$ をつくれば、これは Y/Z に等しい。従って求める各受振点での層厚は、

$$Z = \frac{V_1 (T_{AR} - T_{AR}')}{\cos \theta}$$

となる。 V_1 および V_2 は直接波の走時曲線又は T 曲線より求められ、 θ は $\sin \theta = V_1 / V_2$ より判る。よって、 $T_{AR} - T_{AR}'$ は図上ですぐ求められ Z_R が判明する。各受振点で Z_R を半径とする円弧を描き、それらの包路線をつくれれば、それが第 1 層目と第 2 層目の境である。 $T_{BR} - T_{BR}'$ についても同様である。多重層となる場合はこの作業を繰返して行えばよい。すなわち速度走時曲線をつくれれば第 3 層目の速度が判明し、第 2 層目については前述の方法で深さが判明するので、それを使って第 3 層目の深さを知ることができる。

従って、上層から順に表面除去法を繰返していけば各層の深さと形を順々に求めていくことができる。

図-8, 9 は A 測線と B 測線の走時曲線より速度走時曲線を求めた結果である。

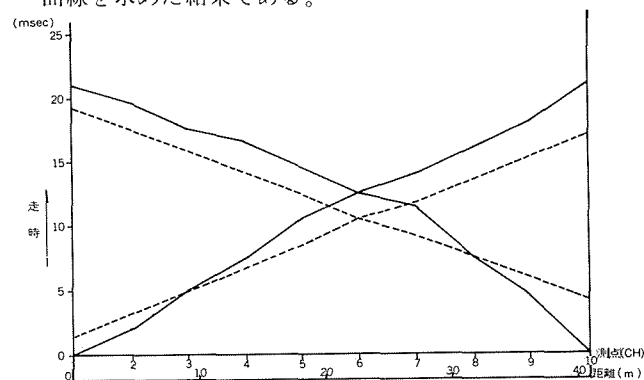


図-8 A 測線走時曲線

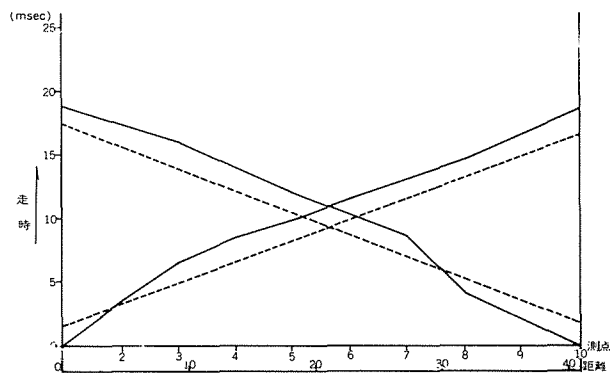


図-9 B測線走時曲線

5-2 ボーリング孔を利用する方法

速度検層といわれているこの方法は、振源からピックアップまでの深さ x と、伝達時間 t を求める。その結果から走時曲線を描き、速度傾斜 $1/V$ を算出する。図-10はこの概要を示したものである。

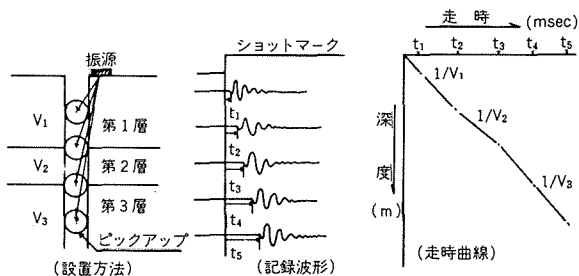


図-10 速度検層の概要図

図-11～14は速度検層の結果を示したもので、図中の弾性波速度は、波形より読み取った波の立上りまでに要する時間(初動)をグラフにプロットして得られる曲線の傾きである。

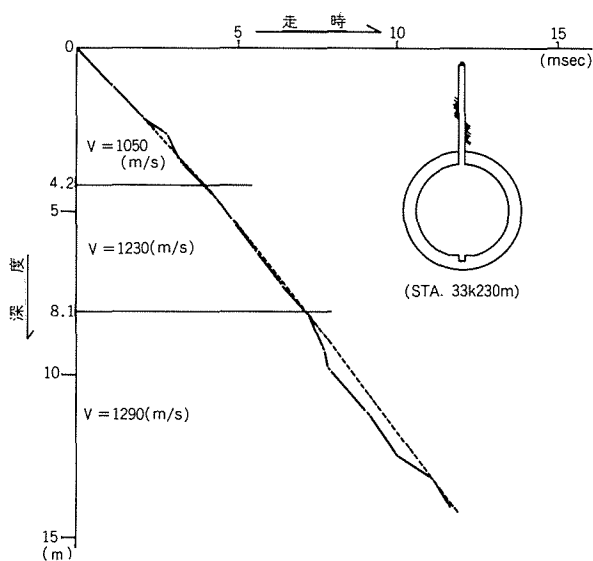


図-11 走時曲線

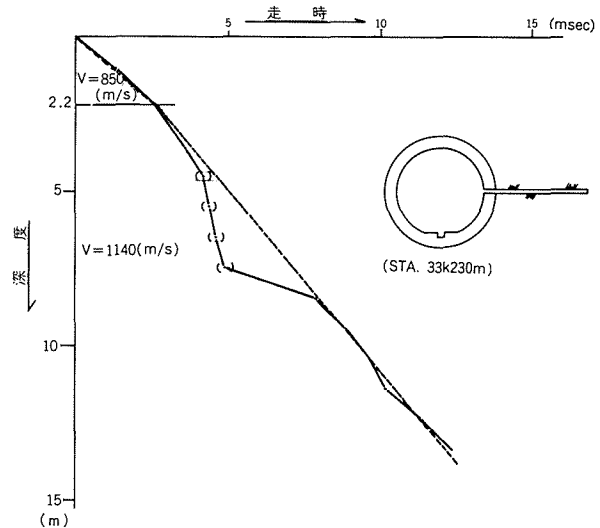


図-12 走時曲線

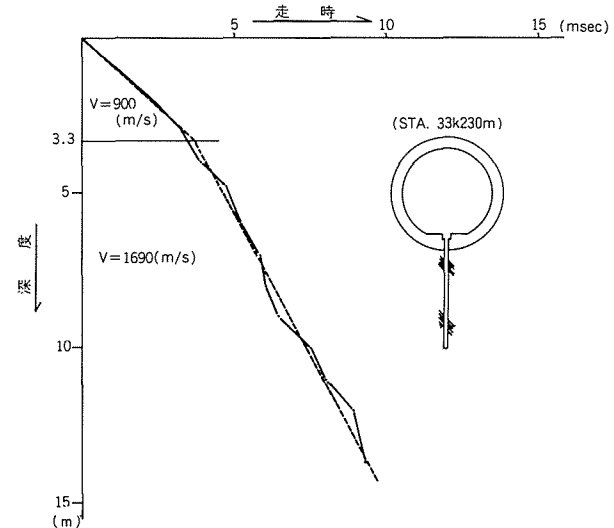


図-13 走時曲線

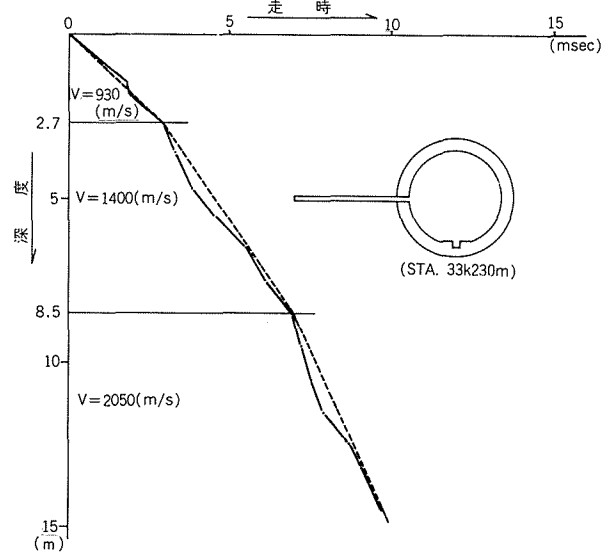


図-14 走時曲線

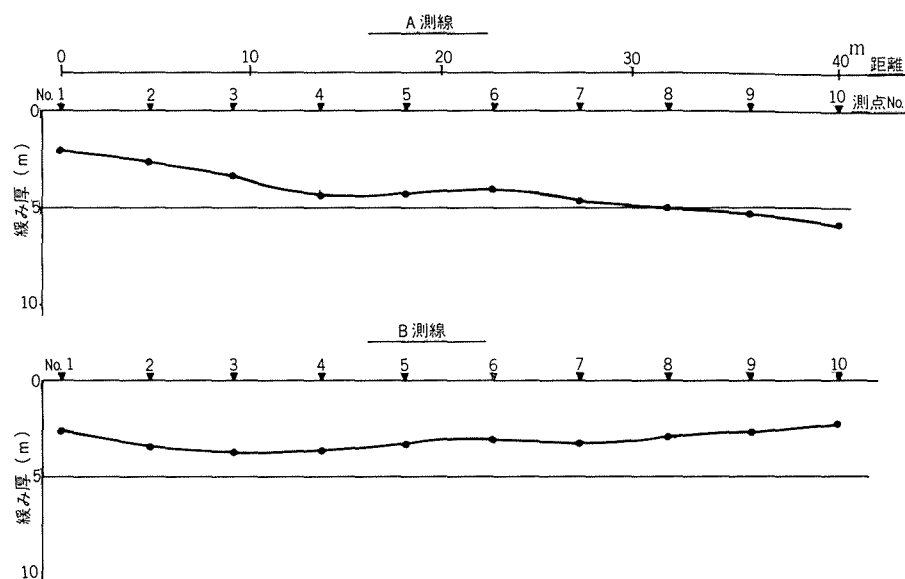


図-15 測定方法(1)による緩み領域

§ 6. 緩み領域の推定

測定現場付近の地山の弾性波速度は図-1の中にも示してある様に、1.6~2.0km/sec位である。この程度の速度をもつ岩質は泥岩の乱されていないもの、いわゆる健岩の状態である。そこで1.6km/sec以下を緩みの発生している領域とする。

6-1 測定方法(1)による結果

図-15はA及びB測線につき各々3回ずつのデータを取り出し、その平均をもって緩み領域の範囲とした図である。

A測線について言えば、緩み領域の速度 $V=1.4\sim 1.6$ km/secで、その範囲は2~6mである。また図が示すように切羽より遠くなるに従って、緩み領域は増大する傾向にある。これは掘削後の応力解放によって緩み領域が時間経過と共に漸増してゆくことを示している。実際この付近ではストラットの変形、鋼管支保工の座屈のために縫い返し作業を実施している。

B測線について言えば緩み領域は2~3.5mであり、A測線に比べて狭くなっている。そして領域の境界面はトンネルの側壁面にほぼ平行に現われている。

両側線の結果から、川手側よりも山手側の方が緩み領域が大きくなっている。膨張圧は山手側に大きく発生していることがわかる。

6-2 測定方法(2)による結果

図-16は各孔につき各々3回ずつの測定値の平均から求めた弾性波速度分布を示したもので、走時曲線の平均

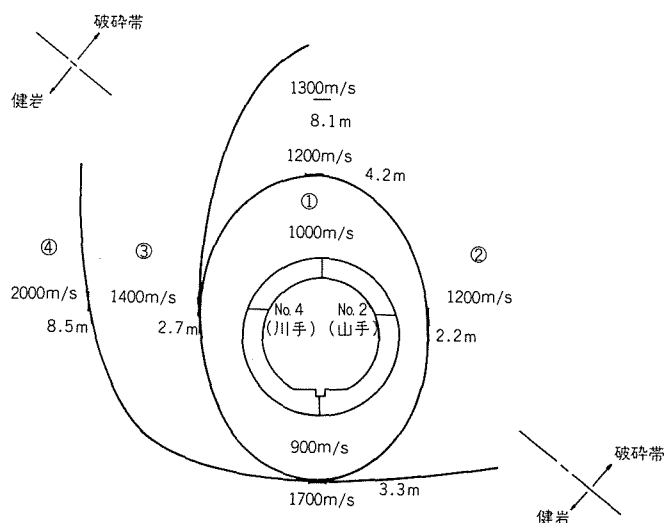


図-16 測定方法(2)による緩み領域

の傾斜である。測定値の中には2km/secをはるかに越える3~4km/secというものもあった。これは泥岩中の局部的に転石状の硬質岩が含まれているためと考えたが、しかしボーリングコアを採取し、地質の状態を観察した結果、硬質岩は認められなかった。そのため解析に際しては平均的傾斜を採用した。

速度分布から5つのゾーンに分け、これを図-16に示す。

- ① $V=0.9\sim 1.0$ km/sec—完全な緩みゾーン
- ② $V=1.2$ km/sec —破砕帯を含む緩みゾーン
- ③ $V=1.4\sim 1.5$ km/sec—緩みが発生しつつあるゾーン
- ④ $V=1.8\sim 2.0$ km/sec—ほぼ健岩
- ⑤ $V=2.0$ km/sec以上 —健岩

ボーリング孔No.1方向では、測定範囲14m以内全てが

1.3km/sec 以下で、ほぼ全域が緩み領域と考えられ、4.2m 付近でゾーン①と②に分けられる。

No.2 では、部分的にケーシング又は押込用ロッドを伝わったと思われる異常信号が記録されたが、この点を除くとやはりNo.1 と同様に低速度層のみが計測されたことになる。緩み領域は測定長13.4m まで全てと考えられ、2.2m 付近でゾーン①と②に分けられる。

No.3 では、3.3m までは0.9km/sec、以深13.4m までが1.7km/sec という明瞭な2層に分けられる。

No.4 では、ゾーン①、②及び③の3層に分けられる。即ち2.7m までが完全に緩み層、8.5m までは緩み又は破碎帯、以深の測定長14.5m までは健岩と考えられる。

さらに川手上方より山手下方にわたって破碎帯があり健岩との境界をなしていると思われる。

以上緩み領域について推定してみたが、図-16からもわかるように、完全な緩み領域は側壁から深さ2.2~4.2m 程度である。この範囲は縦断方向の結果からも伺える。緩みが発生している領域については、川手水平方向は、8.5m 位と考えられるが、天端及び山手水平方向は測定長（約13~15m）よりも以深にあると推定される。

§ 7 . あとがき

トンネル工事における地質の諸問題に関連して本報告が何らかの解決の参考になれば幸いである。

最後にあたり多大な協力をしてくださった松代出張所並びに鉄道建設公団の皆様に感謝の辞を表するものである。

参考文献

- 1)「土木技術者のための弾性波探査法」 服部保正
建設 1964年11月号~1975年10月号
- 2)「強大な地圧に挑む」 トンネルと地下 第9巻4号~6号