地震探査によるトンネルのゆるみ 測定について

小林 雄一※

The Measurement of the rock pressure at tunnels
by Seismic prospecting.

by Yuichi Kobayashi

Abstract

This paper deals with experimental method for estimating the rock pressure in pilot tunnels by seismic prospecting.

By the seismic prospecting, the author measures the distribution of P Wave velocities in pilot tunnels and estimates the rock pressure from the degree of the decrease of P Wave Velocities in the rock and geological conditions.

Still more, he estimates the rock pressure in tunnels by the experimental method of K Terzaghi.

1. まえがき

最近トンネルの建設の際に、地質的な条件に左右されて施工に支障をきたしている場合が少なくない。地質の問題は種々あるがトンネルにとって一番大きな問題は地圧に関する問題である。この地圧に対しては、テルツァギー、プロトジャコノフ等の代表的な理論がある。

とくにテルツァギーは上被り、地層の傾斜、亀裂の程度などに応じて詳細に荷重の限界値を考察し、経験式を提唱した。我々は現在、現場の地質状況をこの経験式に対比して、ゆるみ高を求め、地圧を推定している事が多い。これら大ざっぱな推定を、導坑における、ゆるみ高を地震探査を利用して求め、より現場の地質状況に適合した値を推定しようとしたのが本試験の目的である。

※ 北海道開発局土木試験所

試験箇所は一般国道 229号小樽一江差線，横瀬トンネル，旭川管内町村道十勝三股線三国トンネルである。

2. 試験方法

試験方法は導坑の岩盤に直接Pickup（受震器）を適当な間隔（2～3 m）で設置し，ダイナマイトによる震源でP波をとらえ，震源を適宜変えることにより，導坑内壁からの岩盤の速度分布を測定し，地山の速度（導坑，掘削による影響のない状態）と比較することにより，導坑掘削による岩の速度の低下度を測定し，速度低下の度合と地質状況から，ゆるみ範囲を推定しようとするものである。使用器機は米国E. T. L. 社製，PRA 2型屈折用地震探鉱器24成分で，上下動18C. P. S. のPick up を用いた。

測定方法としては，トンネル導坑の両上隅部箇所と，側壁部箇所とにそれぞれ，2.5～3.0mの間隔に，Pick up を24個石膏で設置する方法を取った。

震源は10～12m 間隔とし，ダイナマイト量は30gr～50gr程度とした。（50gr 以上は坑内支保工を破壊させる恐れがあるため使用しなかった。）発破はダイナマイトを20～50cmの深度で岩盤中に埋設して実施したが，たまたま発破深度が浅いことと上記の理由で火薬量が少ないため，いわゆるクキクキが悪く記録も不満足なものがあった。

3. 試験地の地質概況

(1)横瀬トンネル

この地域に発達する地質は，新第三紀に属する堆積岩類や，同時期の火山岩類であり，新第三紀に属する岩層は下位から訓縫層，八雲層，黒松内層および火山岩類である。

当トンネル地点は，火山岩類で占められ，トンネル導坑の地質は安山岩を主とし，部分的に集塊岩および角礫凝灰岩を夾在している。安山岩は節理が発達しており，その方向は，ほぼ南北系と東西系であり，さらに若干の亀裂が見られる。集塊岩および角礫凝灰岩には節理および亀裂はきわめて少なく，湧水もほとんどない。集塊岩および角礫凝灰岩は，トンネルの熊石側の坑口より，40m 付近までで，他は安山岩で占められている。

施工前の地震探査によれば，トンネルフォーメーション付近のVP（岩盤の弾性波伝播速度）は4 km/sとなっている。

(2)三国トンネル

このトンネル地域に分布する地質は，先白亜紀の日高層群，新第三紀の緑色凝灰岩，変朽安山岩および，これを貫く安山岩類で，日高層群は黒色粘板岩を主とするもので標高 1.200m 付近から低標高部にかけて，広い分布面積を有し，入りくんだ水系に刻まれた急峻な地形を形成している。この日高層群をおおって，稜線付近に緑色凝灰岩，変朽安山岩，安山岩が分布し，変朽安山岩の一部は緑色凝灰岩中に，安山岩は変朽安山岩中にそれぞれ進入している。

トンネルには前記、緑色凝灰岩および安山岩が現出し、トンネル坑口より75m 付近までは緑色凝灰岩で、部分的に珪化されて、硬質の岩盤となっている箇所がある。75m より以深は変朽安山岩、安山岩で、部分的に緑泥岩化し、粘土化した箇所が見られるが、全体的に硬質な岩盤である。断層は小規模なものが数多く見られ、ほぼN25°～40°Wの走向を持つものが多く、その断層面に沿って湧水が見られる。また、主な亀裂も、これらの断層面に平行なものが顕著で、次いでは、これと直交する亀裂が目立つ。従って岩は比較的硬質であるが、亀裂、断層によるブロック化が進んでいる箇所が多い。

4. 地山の実速度測定

試験結果について、横澗、三国の各トンネル別に記すと下記の通りである。

(1)横澗トンネル (L=280m)

このトンネルについては、天盤両上隅部と側壁部に、測線を設定し、トンネル導坑の速度分布と、アーチ部、側壁部のゆるみの相違とを調査した。

i)天盤部

天盤部の走時曲線図をみると、ほぼ3層構造と推定され速度および深度を算出すると、その結果は表-1のとおりである。

表-1 天盤上隅部

第1速度層(km/s)	厚さ(m)	第2速度層(km/s)	厚さ(m)	第3速度層(km/s)	厚さ(m)
1.5 ± 2.0～2.2	1～2 1～2.5	2.2～2.7	2.4～6 (海側) 2.5～6.8 (山側)	3.2～3.7	

ii)側壁部

側壁部は天盤付近と異なり、走時図から2層構造に大別され、天盤部の第2速度層の2.2～2.7 km/sに相当する部分を欠除している。結果は表-2のとおりである。

表-2 側壁部

第1速度層(km/s)	厚さ(m)	第2速度層(km/s)	厚さ(m)	備考
1.5～1.6	0.5～0.9	3.2～3.5		第1速度層、部分的に1.3～2.0 m

(2)三国トンネル (L=1,118m)

横澗トンネルの結果から、側壁部のゆるみは天盤部に比較して、かなり小さいことが判明したので、三国トンネルでは坑口付近、層雲峡側約150mについて、天盤両上隅についてののみ実施したが、横澗トンネルの天盤部と異なり、複雑な2層構造を示す。Pick upの配置および側定方法は横澗トンネルと同様である。

試験結果は各々の測線それぞれ変化があるので、各測線別に記すと、下記のとおりである。

i) 測線 A (坑口より10～79 m 天盤東側上隅)

表-3

第1速度層(km/s)	区間(m)	厚さ(m)	第2速度層(km/s)
1.3	10～20	1～2	2.1 } 2.5
1.5	20～50	1.5～5	
1.8	50～60	3～4	
3.0	60～79	1.5	3.3

この測線においては測線の30 m前後と50 m近辺に 2.0km/s 以下の低速度帯の比較的厚い地帯がみられる。

ii) 測線 B (坑口より10～79 m 天盤西側上隅)

表-4

第1速度層(km/s)	区間(m)	厚さ(m)	第2速度層(km/s)
1.2	10～20	1～2	2.8～3.0
1.3～1.4	20～35	1～2	
1.7	35～60	2～5	
2.5	60～75	7	3.2～3.5
1.2	69付近一部	2	

この測線では測点35～60 mにかけて低速度な第1速度層の分布がみられるが、60～75 m近辺にかけての第1速度層は導坑の段階ではいくらか亀裂を発生せしめたために生じた速度の低下現象がみられる。地山は前記東側地山に比較して0.3～0.5 km/sの速度の上昇がみられる。

iii) 測線 C (坑口より85.5～154.5 m 天盤東側上隅)

表-5

第1速度層(km/s)	区間(m)	厚さ(m)	第2速度層(km/s)	備 考
1.9	85.5～115.5	1.3～2.8	3.5	第1速度層は85.5 mから115.5 mにかけて漸次深度を増す
2.8	115.5～154.5	6～10	～4.3	第1速度層115.5～135.5 m=8～10 m 135.5 mから6 m

この測線では 2.0km/s 以下の速度層が第1速度層として分布する地帯と、直接導坑掘削によって亀裂面、断層面に沿ってある程度弛緩した岩体が厚く広く第1速度層として現れている地帯がある。

iv) 測線 D (坑口より85.5～154.5 m 天盤西側上隅)

表-6

第1速度層(km/s)	区間(m)	厚さ(m)	第2速度層(km/s)	備 考
1.5～1.8	85.5～115.5	1～2.5	3.5～4.4	第1速度層85.5～97 m=2 m 97～115.5 m=1 m±
1.5	115.5～154.5	1.4～3.0	3.4～4.4	第1速度層127 m付近=3 m 133.5～142.5 m=0.5 m 第2速度層 134.3～144.3 m=3.5km/s

以上三国トンネルの速度分布を表-3～6、図-1で記したように、横澗トンネルに比較して、左右非対象の速度分布を示す箇所が多い。

この事は逆に断層、亀裂に支配されたゆるみ分布の特徴を示すものかも知れない。したがって断層、亀裂の性状によっては、偏圧をもたらす原因となる。これを裏付けるものとして、測点 160 m 付近の切抜げの際、東側上隅部において岩石の崩落が生じた。この崩落は導坑開削により、断層面、亀裂面が開口し、かなりゆるんだ岩体（速度層 2.8 km/s）がさらに切抜げにより断層亀裂面の開口を助長させたものと思われるもので測定結果と一致する。

5. 試験結果の検討

(1) 地圧ゆるみ高の推定

地震探査で得た速度層とトンネルの地質状況から地圧として働く、ゆるみ高を推定すると、

イ) 横潤トンネル

このトンネルの地質状況は前記のように亀裂も少なく、断層等の地質構造的ものもあまりない。従って側壁部と天盤部とに分けて測定した速度分布は、側壁部は 2 層構造で、第 1 速度層の 2.0 km/s 以下の速度層は 0.5～0.9 m の深度を示し、この速度層の発生原因の大部分は掘削時の発破による節理面の開口、亀裂の発生による直接損傷的なものである。天盤部は側壁部と比較して図-2 のように複雑な 3 層構造を示し、第 1 速度層は側壁部と同様な性質のものであるが、第 2 速度層は、第 1 速度層の発生により派生的に節理面、亀裂面が開口し（部分的に小亀裂など発生）また地山の圧力によって、さらにそれらが助長されたと思われるもので、潜在的な地圧ゆるみである。しかし、長時間素掘で放置するものでなければ、地質と速度値から考えて、地圧ゆるみと考える必要はない。第 3 速度層は側壁部の第 2 速度層同様地山の速度値を示す。従って、地圧ゆるみは側壁部で 1 m 未満、天盤部で 1～2 m 未満と推定される。

図-2 模式断面図

ロ) 三国トンネル

このトンネルは横澗トンネルと異なり地質構成も複雑で亀裂、断層等も数多くみられ、珪化、粘土化作用も所々にみられ、岩質的にも変化に富んでいる。

断層は、ほぼ $N 30^{\circ} \sim 55^{\circ} W$ を示し、その他、これと直交するものが多い。ほとんどの断層からは湧水がみられる。亀裂もこの断層に支配された方向性をもっている。速度分布を 2.0 km/s 以下と $2.0 \text{ km/s} \sim 3.0 \text{ km/s}$ 、 3.0 km/s 以上とに分けて考えると導坑掘削前の $V P$ から考えると坑口付近を除いて 3.0 km/s 以上は、導坑開さくに関係のない地山の速度値と考えられる。従って 2.0 km/s 以下、 $2.0 \sim 3.0 \text{ km/s}$ のものについて考察すると、

1) 2.0 km/s 以下の速度層

この速度層は、横澗トンネル同様、導坑掘削による影響が強く現われて、ゆるみとなっているゾーンと思われ、特に岩質差により、又断層の存在、亀裂の頻度により、ゆるみのピークの深さが異なる。又その方向性も断層、亀裂の方向に沿う傾向を示す。

2) $2.0 \sim 3.0 \text{ km/s}$

この速度層は風化の進んだ坑口付近は地山の速度値であるが、地山内部におけるものは、横澗トンネル同様、潜在地山ゆるみ帯である。特にこのトンネルに於ては、横澗トンネルと異なり、小断層が発達して、かなりブロック化が進んでいる地帯にみられることから、断層、亀裂等の地質構造線に沿って地山深部迄発生したこの速度帯を長い間放置したり、切り抜けることにより容易に速度が低下し、特に断層面からの崩壊を生ずる恐れがある。

(2) 地圧ゆるみ高の K. Terzaghi の表への適用

地圧に関係するゆるみ高は前記のように、横澗トンネルでは部分的に 2 m 近くのものがあるが、大部分側壁部で $60 \sim 70 \text{ cm}$ 、天盤部では 1 m 程度である。三国トンネルにおいても、部分的に $3 \text{ m} \sim 5 \text{ m}$ 前後の断層、亀裂面に沿う深いゆるみのピークがあるが、ほぼ 2.5 m 程度である。

以上の値を次に示すように K. Terzaghi の分類に従って、本坑に適用して地圧ゆるみ高を算出してみると横澗トンネルは地質状況から K. Terzaghi の分類(1)～(4)の範囲に入るので、経験式は $HP = aB$ である、但し B はトンネル巾、

$$\therefore 1 \text{ m} = a \times 3 \text{ m} \quad a = 0.33$$

したがってこの 0.33 は分類表の(4)に相当する、

$$\therefore \text{本坑の場合} \quad HP = 0.33 \times 8.88 \text{ m} \doteq 3.0 \text{ m} \quad (\text{但し } 8.88 \text{ m} \text{ は本坑のトンネル巾})$$

同様に三国トンネルは分類表の(4)以下に相当する地質状況なので、

$$\text{経験式は } HP = a(B + H_t)$$

$$\therefore 2.5 \text{ m} = a \times (2.8 \text{ m} + 2.6 \text{ m}) \quad \therefore a = \frac{2.5}{5.4} = 0.46$$

したがって Terzaghi の表-(5)に相当する

$$\therefore 0.46 \times (B + H_t) = 0.46 \times (9.50 \text{ m} + 8.60 \text{ m}) \doteq 8 \text{ m}$$

以上から本坑においては、横瀬トンネルで3.0 m、三国トンネルでは8.0 m程度が最終地圧ゆるみとして働くことになる。

6. 結 語

以上導坑掘削に伴う地山のゆるみと、それによって生ずる地圧について、地震探査により、ゆるみ高を測定し、Terzaghiの経験式からトンネルの地圧を推定した。その結果を列記すると下記の通りである。

①今回の試験場所は安山岩系の岩石が大部分を占めていて、集塊岩、凝灰岩などの軟弱な岩石が部分的にみられる程度なので、全体的に硬質な岩盤となっている。したがって、ゆるみの原因の大部分は、導坑開削による断層面、亀裂面の開口、火薬などによる亀裂の発生などによるものであり、泥岩、凝灰岩などにみられる、粘土化、および吸水膨張現象による、ゆるみは、ほとんどみられない。

②ゆるみは、岩質、地質的構造に支配される傾向を示し、断層、亀裂等が少なく土被りも薄い、塊状で良質な火成岩の地圧に関係するゆるみは、掘削に伴う、爆破、さく孔による直接損傷領域が大部分である。

③ゆるみの高さ、形状は、天盤付近では高く形状も速度分布にみられるように複雑である。それに対して側壁部はゆるみ高も低く、形状も単純である。

④地圧に関係するゆるみは一応速度値で、2.0 km/s以下としたが、この値はあくまで地山の速度値と相対的に決まるものである。更にこの速度層の背後あるいは、直接、坑壁のゆるみに伴い、派生的に節理面、亀裂面、断層面が開口し（部分的に小亀裂等発生）、地山の圧力によりさらにそれらが助長されたと思われる、ゆるみ帯が特に天盤付近に存在する。（地山より20～30%程度速度低下）この速度帯は、そのトンネルの地質状況によっては、切り上げたり、大きな断面のまゝ岩盤を長い間露出しておく、危険である。従ってトンネルの地質状況いかにによっては、支保工立て込み、ライニング等の施工を早急に実施し、このゆるみ帯の成長を防止する必要がある。

あとがき

今回は比較的硬質の岩盤について実施したもので、なお多く問題が残されている。例えば粘土化、吸水膨張等のトンネル建設に最もやっかいな現象を生ずる、泥岩、凝灰岩等の軟質な岩盤のゆるみの問題、時間的経過と速度帯の変化、さらに地圧に関係する、ゆるみ速度層の問題などがあげられる。今後、これらの問題について検討してみたい。

文 献

- 1) Proctor and white : Rock Tunneling with Steel supports.
- 2) 高橋彦治他 (1963) : 新丹郡トンネルにおける温泉余土の膨張と岩石荷重, 鉄道技術研究所報告.
- 3) 坂本真雄 (1965) : トンネル鋼アーチ支保工, 土木ライブラリー.