

## 1 緒 言

トンネル工事は施工法選択の適不適が、工期・工事費に大きく影響する。そのため、着工前の綿密な地質調査とともに、着工後もたえず岩盤の力学的性質の把握に努め、その変化に機敏に対応できるような体制をとることが必要である。ここでは国鉄新深沢単線トンネルおよび関電木曾5号導水路トンネルの工事の施工にあたって、地質調査の結果をどのように判断し、途中で工法を変更したことがいかに効果的であつたか、またS波の観測によつて、岩盤の弾性定数をトンネルの進行とともに随時測定し、その値をもとにして支保工間隔や巻厚の変更をどのように行なつたか等について、二・三の実例につき説明する。

## 2 新深沢トンネルにおける例

新深沢トンネルは40年4月着工した全長1628mの単線形トンネルであるが、この中心線に沿つての地質調査の結果は図-1のように示されていた。これによれば、かなりの数の破碎帯がみられるが、弾性波速度が大体 $4.0 \text{ Km/sec}$ となつていので一応全断面掘削で開始した。しかし、掘削が進むにつれて、湧水を伴う粘板岩と砂岩の破碎された地帯が案外多く、また弾性波速度も $4.0 \text{ Km/sec}$ に達していない区間がかなりあつた。

そこでその後の掘削計画の参考資料とすべくこのトンネルの地山を地表踏査から詳細に観察したが、1100m付近までは、粘板岩および砂岩の小仏層群であり、あまり大きく破碎された部分はない。しかし、1100mから少し先にある観音沢は破碎帯であり、この沢から先は黒雲母花崗岩の分布がみられ、砂岩・粘板岩はその影響をうけてホルンフェルス化が著しく、数本の断層も認められた。

このトンネル予定線の約200m南に、現在線の新横吹第2トンネルがあるが、この少し北側に、国鉄が一度掘つたが使用を断念した旧トンネルがある。このトンネル内には無数の亀裂が認められ、これは、観音沢南側地帯にみられる断層によつて偏圧を受けたものと考えられ、この付近にある地入り跡とともに、決して地盤は良好でないことが判断された。さらに、最後の区間である東口100mほどの間は、径数 $cm$ ～数 $10cm$ 大の角礫からなる崖錐層であり、この部分は施工基面から地表までの厚さは薄いので、トンネルは崖錐中を掘進することになり、多大の困難が予想された。

また41年3月半ばからこの崖錐地帯に傾斜計、旧トンネル内に伸縮計をおいて、地山の動きを観測したが、これらの結果から、この地域の上層は現在もおおしずつ動いていることが判明した。

このような各種の資料から、観音沢から先は岩質は相当悪いものと判断し、全断面掘削は無理であると思われたので、いつでも底設導坑先進に切替えられるような準備を整えて進行中、1182mの地点まで来たとき切羽の鏡が押されたので、全断面掘削を中止し底設導坑先進に切替えた。上述のように事前に充分調査しておいたので工期に支障なく工事を進めることができたわけである。

つぎに、この施工基面における岩盤の力学的性質を定量的に把握するため坑内弾性波測定を行ない、観音沢付近から導坑内部にわたつて弾性定数を求めた。その結果は表-1の通りで、導坑に切替えた部

分から岩盤の状態が相当悪くなっていることがわかる。

この結果から、当初示された支保工 125H 1.50m 間隔、巻厚 30cm では不充分であると判断されたので、図-1 に示すごとく、観音沢より東は支保工 125H、1.00~1.20m 間隔、巻厚 45cm に設計変更された。

図-1 新深沢トンネル物理探査断面図(国鉄資料)および支保工巻厚表示図

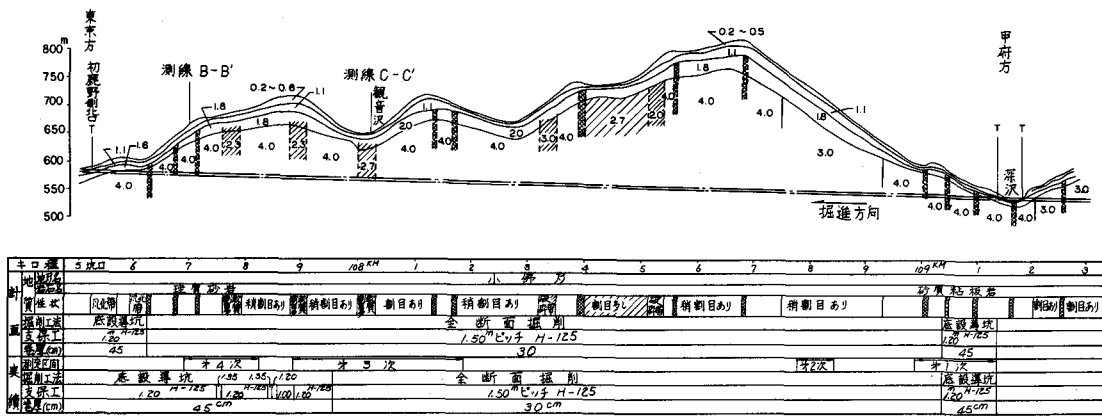


図-2 国鉄新深沢単線トンネル標準断面

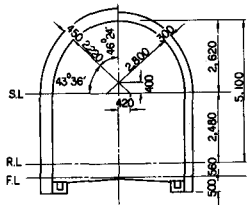


図-4 関電木曾発電所導水路標準断面

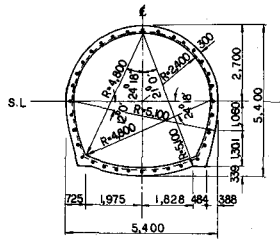


表-1 新深沢実験結果：弾性波伝播速度および弾性定数

|                              | オ 1 次                 |                       |                       |                       | オ 2 次                |                      |                       |                      | オ 3 次                |                      |                       |                      | オ 4 次     |           |           |           |
|------------------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|-----------------------|----------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 測定区間                         | 0~162                 | 297~334               | 334~362               | 297~362               | 960~1100             | 1100~1200            | 1200~1265             | 1265~1326            | 1326~1391            | 1391~1457            | 1457~1512             | 1512~1577            | 1577~1642 | 1642~1707 | 1707~1772 | 1772~1837 |
| Vp : P 波速度 km/sec            | 3.03                  | 4.18                  | 3.46                  | 3.84                  | 3.85                 | 3.25                 | 2.95                  | 1.5                  | 3.45                 | 1.95                 | 2.60                  | 1.60                 |           |           |           |           |
| Vs : S 波速度 km/sec            | 1.24                  | 1.80                  | 1.09                  | 1.40                  | 1.20                 | 0.85                 | 0.75                  | 0.35                 | 1.35                 | 0.75                 | 1.10                  | 0.65                 |           |           |           |           |
| σ : ボアソン比                    | 0.399                 | 0.386                 | 0.445                 | 0.423                 | 0.446                | 0.463                | 0.465                 | 0.475                | 0.409                | 0.414                | 0.391                 | 0.407                |           |           |           |           |
| E : ヤング率 kg/cm <sup>2</sup>  | 10.53×10 <sup>4</sup> | 22.90×10 <sup>4</sup> | 8.41×10 <sup>4</sup>  | 13.66×10 <sup>4</sup> | 10.2×10 <sup>4</sup> | 5.2×10 <sup>4</sup>  | 4.04×10 <sup>4</sup>  | 0.88×10 <sup>4</sup> | 13.0×10 <sup>4</sup> | 3.3×10 <sup>4</sup>  | 7.3×10 <sup>4</sup>   | 3.03×10 <sup>4</sup> |           |           |           |           |
| K : 体積弾性率 kg/cm <sup>2</sup> | 17.45×10 <sup>4</sup> | 33.54×10 <sup>4</sup> | 25.42×10 <sup>4</sup> | 29.69×10 <sup>4</sup> | 3.16×10 <sup>4</sup> | 23.5×10 <sup>4</sup> | 16.02×10 <sup>4</sup> | 5.1×10 <sup>4</sup>  | 21.3×10 <sup>4</sup> | 7.8×10 <sup>4</sup>  | 13.2×10 <sup>4</sup>  | 5.1×10 <sup>4</sup>  |           |           |           |           |
| μ : 剛性率 kg/cm <sup>2</sup>   | 3.77×10 <sup>4</sup>  | 8.26×10 <sup>4</sup>  | 2.91×10 <sup>4</sup>  | 4.80×10 <sup>4</sup>  | 3.5×10 <sup>4</sup>  | 1.8×10 <sup>4</sup>  | 1.38×10 <sup>4</sup>  | 0.3×10 <sup>4</sup>  | 4.65×10 <sup>4</sup> | 1.43×10 <sup>4</sup> | 3.09×10 <sup>4</sup>  | 1.08×10 <sup>4</sup> |           |           |           |           |
| λ : Lame の 常数                | 4.99×10 <sup>4</sup>  | 28.03×10 <sup>4</sup> | 23.48×10 <sup>4</sup> | 26.49×10 <sup>4</sup> | 29.2×10 <sup>4</sup> | 22.3×10 <sup>4</sup> | 15.1×10 <sup>4</sup>  | 4.9×10 <sup>4</sup>  | 18.2×10 <sup>4</sup> | 6.8×10 <sup>4</sup>  | 11.15×10 <sup>4</sup> | 4.38×10 <sup>4</sup> |           |           |           |           |
| ρ : 密度(推定) kg/m <sup>3</sup> | 2,400                 | 2,500                 | 2,400                 | 2,400                 | 2,400                | 2,400                | 2,400                 | 2,400                | 2,500                | 2,500                | 2,500                 | 2,500                |           |           |           |           |

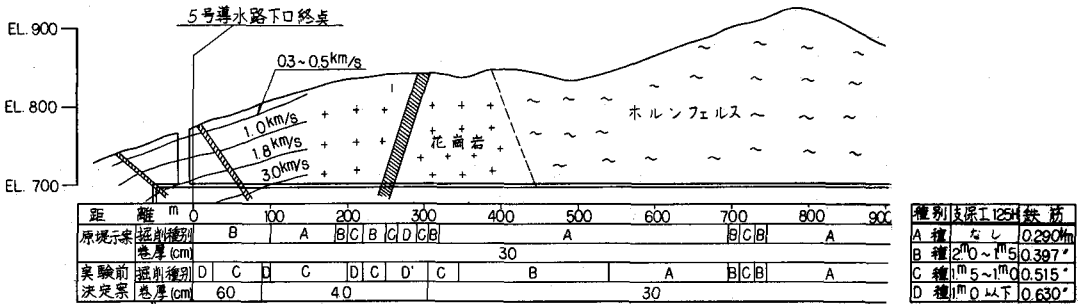
3 木曾トンネルにおける例

木曾トンネルは40年6月着工で施工区間909mであるが、この中心線に沿つての地質資料(地震探査は坑口から100m付近まで)は図-3原提示案のように示され岩質は花崗岩で割合良好という事であった。しかし、全断面掘削を開始してみると意外に風化が著しく、また粘土質が多く、予期したものと相当異なることが判明した。したがつて100mを掘削した時点で再検討され、その結果、岩質および巻厚が図-3の実験前決定案のように変更された。しかし350m付近で破砕帯に遭遇し、この区間の切抜けに一時頂設導坑に切替へ多大の日時を費したため、さらに詳細に地質構造を把握することが大

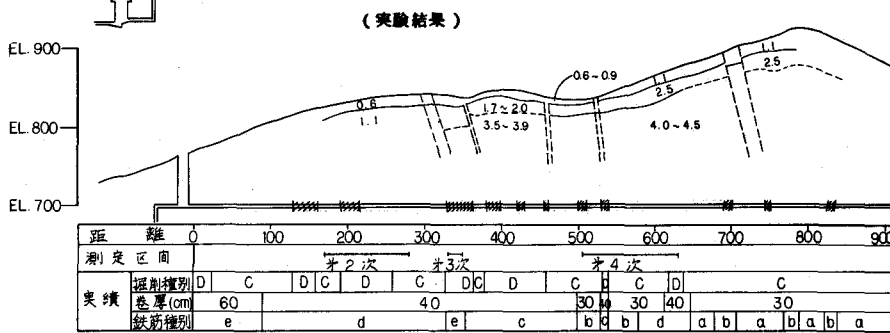
切であると判断され、中心線全体にわたって地震探査をかけると同時に、坑内で弾性波速度を測定し、施工基面での岩盤の力学的性質の変化の推移に注目した。また、地表地質の観察も綿密に行ない、これと地震探査の解釈の結果と総合して、図-3のような地震探査縦断面図を得た。地震探査の解釈および断層予知については別に報告されるのでここでは触れないが、弾性定数計測の結果は表-2の通りで、350m付近ではとくに悪いことがわかる。その後掘削が進んだのちに500~650mで計測した弾性定数と比較すればその差がはつきりしている。

この資料によつて全線の岩質種別を決め、支保工間隔および巻厚も、当初の予定より大巾に設計変更された。すなわち、A、B種がなくなつて全延長にわたつてC、D種に変更され、配筋φ種が追加された。最終的には図-3実績欄の通りである。最初の資料によれば全断面掘削が可能と思われたのでこの施工法を採用したのであつたが、このため350m付近の破砕帯の通過に難渋し機械の組替えその他で工期が遅延する結果となつた。最初から上述のような地質状況が判明しておれば、あるいは別の工法を採用して一層順調に進行できたかも知れない。

図-3 木曾トンネル地質調査縦断面図（調査資料）



| 種別 | 支保工     | 125H   | 鉄筋 |
|----|---------|--------|----|
| A種 | なし      | 0.290m |    |
| B種 | 2"0~1"5 | 0.397" |    |
| C種 | 1"5~1"0 | 0.515" |    |
| D種 | 1"0以下   | 0.630" |    |



支保工種別は上と同じ、ただし持Dは150H使用40~100cmピッチ

| 種別 | 支保工  | 巻厚  | 鉄筋     |
|----|------|-----|--------|
| a種 | D-25 | 250 | 16-400 |
| b種 | D-25 | 200 | 16-400 |
| c種 | D-25 | 200 | 16-400 |
| d種 | D-25 | 200 | 16-400 |
| e種 | D-25 | 150 | 16-400 |

(350m附近詳細図)

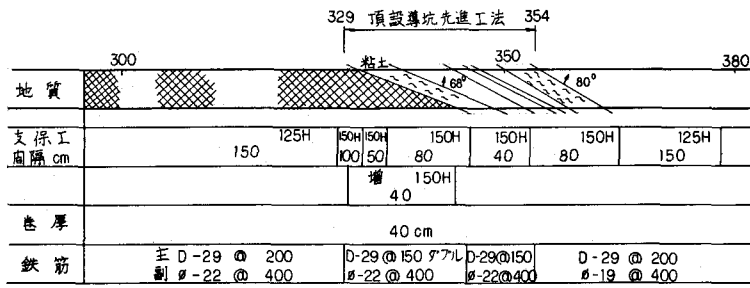


表-2 木曾実験結果：弾性波伝播速度および弾性定数

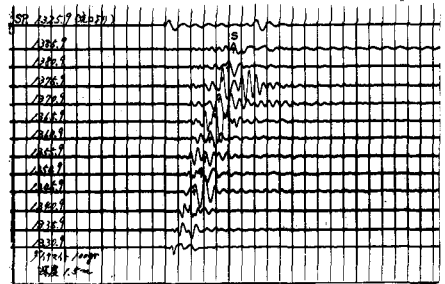
|                                  | オ 1 次              | オ 2 次               |                     |                     | オ 3 次               |                     | オ 4 次               |
|----------------------------------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| 測定区間                             | 東山横坑内              | 169~219             | 219~270             | 160~270             | 328~339             | 339~351             | 504~631             |
| $V_p$ : P 波速度 $\text{km/sec}$    | 1.76               | 2.93                | 3.60                | 3.24                | 3.50                | 2.70                | 4.00                |
| $V_s$ : S 波速度 $\text{km/sec}$    | 0.65               | 0.97                | 1.15                | 1.05                | 1.30                | 0.70                | 1.7                 |
| $\sigma$ : ポアソン比                 | 0.421              | 0.438               | 0.443               | 0.441               | 0.421               | 0.464               | 0.389               |
| $E$ : ヤング率 $\text{kg/cm}^2$      | $3.07 \times 10^4$ | $6.90 \times 10^4$  | $9.71 \times 10^4$  | $8.09 \times 10^4$  | $12.2 \times 10^4$  | $3.56 \times 10^4$  | $20.7 \times 10^4$  |
| $K$ : 体積弾性率 $\text{kg/cm}^2$     | $6.46 \times 10^4$ | $8.69 \times 10^4$  | $28.56 \times 10^4$ | $23.03 \times 10^4$ | $25.40 \times 10^4$ | $16.20 \times 10^4$ | $30.90 \times 10^4$ |
| $\mu$ : 剛性率 $\text{kg/cm}^2$     | $1.08 \times 10^4$ | $2.40 \times 10^4$  | $3.37 \times 10^4$  | $2.81 \times 10^4$  | $4.30 \times 10^4$  | $1.22 \times 10^4$  | $7.40 \times 10^4$  |
| $\lambda$ : Lamé の常数             | $5.74 \times 10^4$ | $17.09 \times 10^4$ | $26.32 \times 10^4$ | $21.17 \times 10^4$ | $22.50 \times 10^4$ | $15.40 \times 10^4$ | $25.90 \times 10^4$ |
| $\rho$ : 密度 (推定) $\text{kg/m}^3$ | 2,500              | 2,500               | 2,500               | 2,500               | 2,500               | 2,400               | 2,500               |

#### 4 S 波の認定

岩盤の弾性定数の計測には、S 波の認定が重要な要素となるが、P 波と比較して、その初動の立上りを明瞭にすることは、従来からなかなかむづかしい問題となつている。そして S 波発生装置の試作による実験結果などがこれまでに各方面から報告されているが、なかなか簡単にできない点に難点があつた。今回は受震器の設置条件を改善し、全受震点に

つき坑壁に垂直に 30cm の孔を穿孔しこの中に受震器を水平に設置して岩中に固定し測定した。3 成分に受震器を設置することは望ましいが、これであると 1 回での測定点数がわずかになるため、S 波のラインアップとしての認定に不利となる。したがつて今回は上記のようにし、その結果は図-5 の例のように、割合きれいなラインアップが得られた。しかし S 波の発生および認定に関しては引続き今後さらに研究すべき課題である。

図-5 記録例、S 波の認定



#### 5 結 言

岩盤の弾性的性質をあらわす量としては、従来は実用的にはほとんど  $V_p$  (P 波伝播速度) の値のみが使われてきたが、実際にはこれだけでは不十分で S 波をとらえることにより、 $V_s$  の値と組合せて、種々な評価基準により岩盤の硬軟や亀裂破砕の程度を判定する必要がある。今までの経験からすると、

1)  $V_p$  の値 付近の岩盤の  $V_p$  最大値に対して部分的にいくら落ちているかによつて破砕・腐蝕の進行程度を知る目安とする。またかぶりの厚さにも影響される。2)  $V_p/V_s$  の値 2 以下であると良好な岩盤といえる。3) ポアソン比 2) の値と関連するが、完全弾性体の場合 0.25、水の場合 0.5 で、実際の岩石は大体この間にくる。0.33 以下であれば一般に無普請または後普請で掘削でき、0.4 以上になるとあまり良好な岩盤とはいえない。4) ヤング率 (動弾性係数)  $30 \text{ 万 kg/cm}^2$  以上であれば非常に良好な岩盤といえるが、10 万以下では掘削に難渋することが多い。と考えられる。今後実験を重ねることによつて、さらにこの基準を明確にし、これらを総合的に判断した上で従来の経験をも加味して掘削工法や支保工の大きさと間隔、巻厚等を決定することが望ましい。したがつて事前の調査と、必要に応じた工事中の調査の重要性が痛感される次第である。おわりに弾性定数の計測および地震探査については京大防災研究所吉川教授の、地質踏査および解釈については京大資源工学教室鈴鹿助教・港講師の、適切な助言と実地指導によつたことを付記し、ここに深甚なる謝意を表する。

参考文献： 鹿島建設土木工務部「トンネルの岩盤力学実験報告書」

# Introduction of Results of Experiment on Rock Mechanics into Construction Method of a Tunnel

Kajima Construction Co., Ltd.

Chugoro SATO

Yasuhiko KODAMA

Sadao UMEDA

Masakuni MATSUI

With the growth of the scale of tunnel construction, the time and cost of the work is becoming more and more influenced by adequacy or inadequacy of the construction method selected. In this sense, it is most essential for construction engineers to make every effort to catch mechanical characteristics of rock coming accross on the way and to be always prepared to tackle with its mutation as well as to carry out most careful geological survey beforehand.

In this paper, authors describe how the results of geological survey in case of Shinfuka#awa Tunnel of JNR and Kiso Head-race Tunnel of Kansai Electric Power Co. were judged and how effectively the modification of construction methods on the way have worked in both cases. Authors also present some examples to explain how the determination of elastic modulus of rock by measuring S-wave from time to time with the progress of tunnelling was utilized for the modification of interval of timbering and thickness of lining.