

1. 緒 言

トンネル工事が大形化するにしたがつて、適切な工法を採用して能率的に掘削を進めるために、断層・破碎帯を始めとする地質構造や、岩盤の力学的性質を明確に知ることが、ますます重要となつてきている。不十分な事前調査のために、工期途中で思わぬ難関に直面して、そのため多大の経費増と工期の遅延を招来するようなことは、できるだけ避けねばならず、また安全施工の面からも、事前に充分地質状況が把握されていなければならない。もち論、いかに事前の調査を精密に行なつても、トンネル施工基面の岩盤状況を余さず知ることが困難なことではあるが、色々な方法を組合わせて多角的総合的に判断すれば、かなり正確に断層その他を推定できるはずである。こゝでは関西電力木曾発電所5号導水路トンネル工事における事例を主に紹介し、事後の掘削により判明した実際の結果とを対照して、探査の効果を吟味するとともに、今後の改善点をもあわせて考察する。

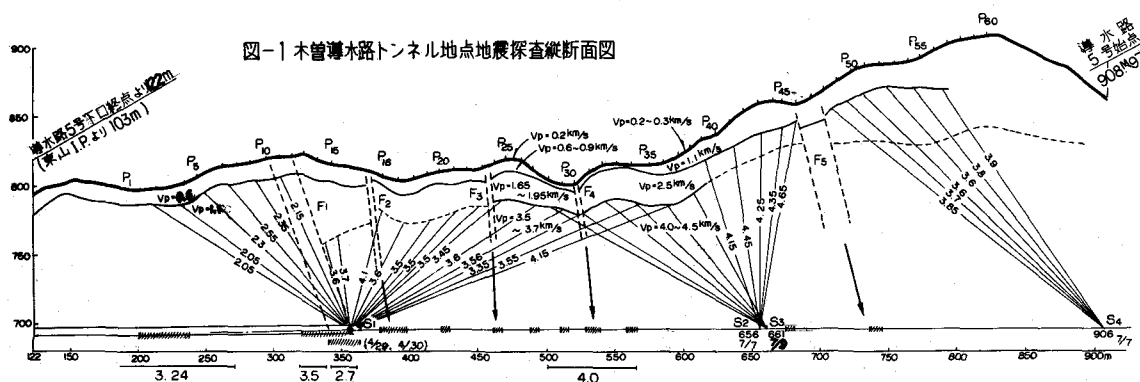
2. 木曾トンネルにおける断層予知

トンネル地点の地質調査としての地震探査のうち、地表面からの屈折法による探査は、従来から広く行なわれてきているが、平原下の割合簡単な構造の場合と違つて、断層・破碎帯が複雑に入り組んだ山の地質構造を解明するためにはこれだけでは不十分で、トンネル掘削の進行とともに随時内部からも調査を行なつて、岩盤状況の把握に努めなければならない。以下木曾トンネルの例で説明する。

このトンネル付近一帯の事前調査は、地表踏査および地震探査が行なわれているが、このトンネル地点には、地震探査は坑口寄りの一部しかかゝつていなかった。そして、地表踏査の資料をもとに推定した岩盤資料が提出されていたが、それによれば岩質は割合良好という結果が出ていたので、全断面掘削で進行した。しかし、掘り始めてすぐに粘土質が出て難渋し、ついに350m近辺で破碎帯に遭遇し、この区間の切り抜けに多大の日時を費した。このため詳細な地質調査の必要が痛感され、トンネル中心線に沿つて全体に、地震探査をかけると同時に、内部からもあたつてみたわけである。

地表からかけた屈折法による地震探査の結果は図-1の通りで、 P_{10} から先は3.5~4.5km/secの速度を持つ第4層を検出し得たが、 P_{11} から坑口側へかけてはこの層の検出ができず、また各層の速度も P_{10} か

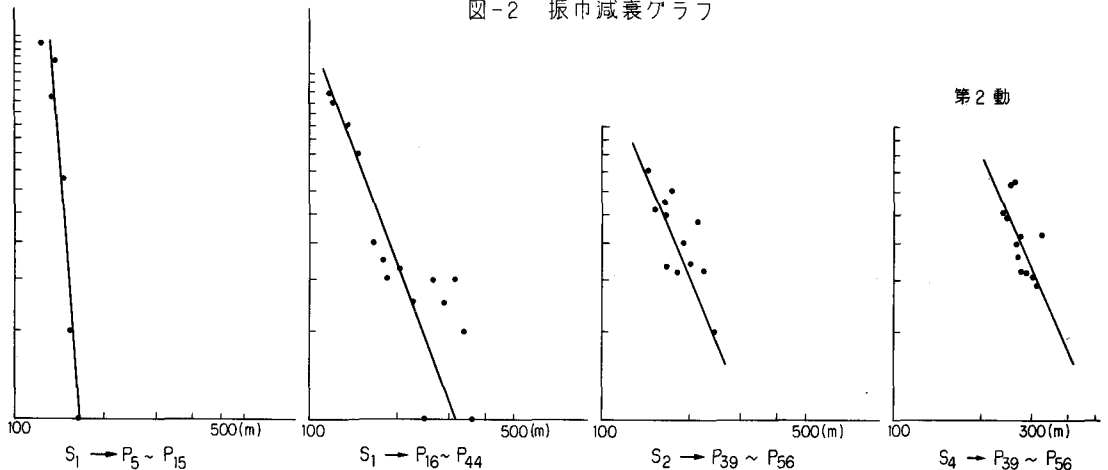
図-1 木曾導水路トンネル地点地震探査縦断面図



ら先の部分よりかなりおちていて、着工前の資料ほど岩質は良好でないことがわかった。しかし、これからだけでは破碎帯の状況が顕著にあらわれなかつたので、切羽の発破を利用し、これを地表面の展開で受けて、内部から調査することを試みた。

この震源は図-1で S_1 と記したが、弾性波発生のための震源としては、軟弱な表土の中でかける発破よりも数等条件がよく、そのため初動の切れも明確であつた。この初動到達時間から、地表面からの探査によつて得た第1層第2層の経過時間を、それぞれ画いた波線経路に沿つて引き去つた時間と、その距離とから、その部分の平均速度を求めてみると、 P_{11} で受震した経路のものが、平均速度が異常におそくなつてゐる。そしてこの隣の P_{13} で受けたものはすでに平均速度がこれより大分高くなつてゐる。このことから、坑内観察で得た破碎帯は、ほとんど P_{11} の経路に沿う F_1 のような形をしていると推定した。また P_{13} の平均速度が高くなつてゐることから、この破碎帯は S_1 付近でもう大体終りであることがわかる。さらに坑内で弾性波速度を測定した結果、図のように3.5と2.7に区分された。この境界は破碎帯の始まりの部分と一致している。また $P_5 \sim P_{15}$ の、切羽からの距離による振巾減衰図を作つてみると(図-2)、他の区間のものより距離による減衰が相当顕著である。これからみても、 P_{11} から坑口側の岩質は、他の部分に比してわるいことがいえる。

図-2 振巾減衰グラフ



第2動

以上はいわばすでに坑内地質で観察された破碎帯を、色々な観点からその姿を確認したことに当るが、この過程で破碎帯や岩質のよくない部分があることによつてどのような現象があらわれるかを知つたことになり、このことから逆に、この方法を用いてこれから先の断層を予知することができるはずである。この立場から、種々検討の結果、図-1のように F_2 F_3 F_5 の各断層を予示した。その根拠は次のようである。

F_2 : 主として地表からの地震探査の結果での各層のくい違いによるが、さらに P_5 と P_{16} での平均速度のかなりの差異にもよる。

F_3 : 地表面からの探査の結果と、 P_{24} P_{26} P_{28} 連続3点における S_1 からの波の振巾の減衰から、これが破碎帯をなぐめに横切つてきたことによる結果の減衰であると判断した。

F_5 : 地表面からの探査の結果と、図-4の如く、 P_{30} における振巾の異常な減衰とそれ以遠の点での波形の変化等から推定した。

また R_4 については、 S_1 からの発破の結果ではあまり明瞭には出なかつたが、これは地形上および地表地質上（湧水もあり、小さな礫が転がっていて、破碎された状態となつている）から、充分注意すべき箇所とした。

これらの予断層は、その後 S_2 まで掘削された坑内の結果と対照してみると、図-1のごとくほとんど一致しており、今まで述べてきた方法の成果を如実に物語っている。

そこで、最後に残された R_5 についてであるが、これは S_1 からの発破では経路が相当長く、また山の傾斜がこの経路とほとんど平行になることから、 R_2, R_3 よりも精度はかなり落ちると考えられたので、トンネル掘削が S_2 まで進んだ機会に S_2 から、またすでに反対側から掘り終つている S_4 からも発破をかけて、両者から R_5 を確定することを試みた。その結果、

1) S_2 の発破では、 R_3, R_4 で初動（P波）の振巾が減衰し、また後部位相（S波が含まれている）の減衰が著しい。これは、 R_3, R_4 で受震した弾性波は、破碎帯のすぐあとに当つていると考えれば、破碎帯を通過する距離が長いために多く減衰したと考えられ、また $R_3 \sim R_4$ でも、 R_1 以前の振動様式と若干異なつている。同様に S_4 の発破でも、破碎帯を抜けてきたと考えられる R_3 での振巾の減衰が著しい。これらのことから、前に推定した R_5 の存在はほぼ確定的である。

2) S_2, S_4 の記録両方とも、 R_3, R_4 受震トレースの後部位相にチューブウェーブ的な波動が観察される。これからみて、この2受震点をカバーするひろがりを持つ破碎帯の存在が考えられる。しかしこの2本のトレースの外側のトレースでは観測されていないので、破碎帯の巾は大きくても20mをこえないと思われる。

図-3 記録例 $S_1 \rightarrow P_{16} \sim P_{38}$

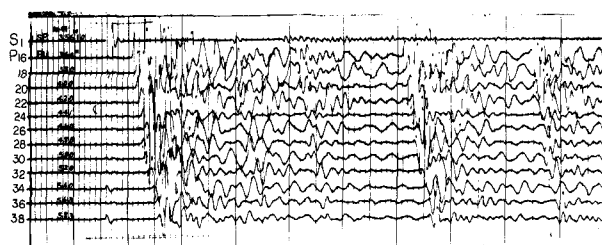


図-4 記録例 $S_1 \rightarrow P_{38} \sim P_{60}$

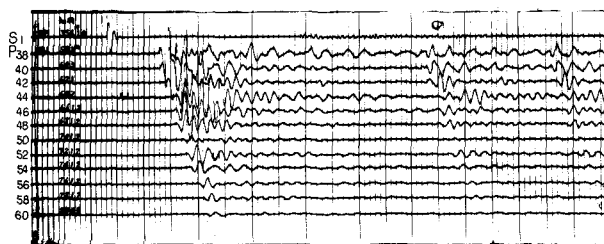


図-5 記録例 $S_2 \rightarrow P_{39} \sim P_{56}$



図-6 記録例 $S_4 \rightarrow P_{39} \sim P_{56}$

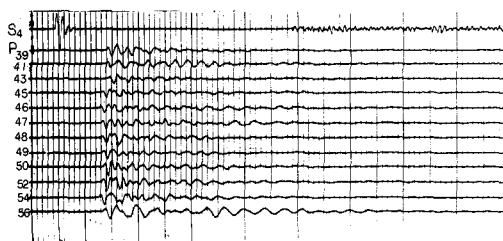
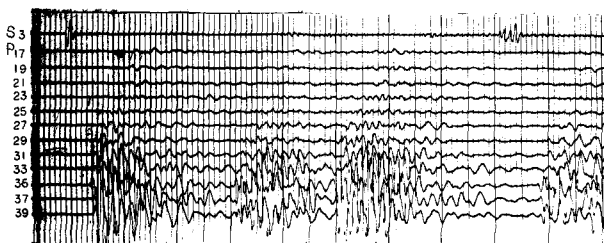


図-7 記録例 $S_3 \rightarrow P_{17} \sim P_{39}$



3) S_4 の記録では、 $R_0 \sim R_3$ に反射波とみられるラインアップが観察される。これを断層面からの反射波と考えれば、破碎帯の傾斜は図のような向きになるはずで、これは今までの断層の傾斜方向から考えても妥当である。

4) 観測走時から表層部分の経過時間を差引いて、表層底までの平均速度を算出すると、破碎帯の両側で多少傾向が違っている。

以上の根拠から P_3 を想定し、たゞ S_2 付近の坑内弾性波速度測定の結果では、P 波速度が 4.0 km/sec と出ていて、 S_1 付近よりかなり岩質もよくなつてきているので、 P_3 ほどの厄介なものではなからうと予示した。

この予知断層はその後の掘削の結果では、施工基面では巾がせまくなつて 5 m であり、それほどの粘土質のはさみもなく、結果としては大したことはなかつた。しかし破碎帯のあつたことは事実であり、予示の結果はほぼ満足すべきものであつたといえる。

次に、 S_1 からの記録ではあまりはつきり確認されなかつた P_4 を、事後にはなるが今後の参考とするため、 S_3 から発破をかけて調査してみた。この結果は図-7 の通り、 $R_1 \sim R_3$ と $R_1 \sim R_3$ とで振動様式がはつきり違っている。すなわち、 $R_1 \sim R_3$ では振巾が大巾に減衰し、また $R_1 \sim R_3$ では反射波がみられる。このように、 R_3 付近に地質の境界面のあることがはつきり認められ、これが P_4 であることは確定的である。これが S_1 からの発破でこのように明瞭にあらわれなかつたのは、 S_1 からの波が、 $P_2 P_3$ とすでに二つの断層を経過してきたために、波が複雑になつて、今のような明確な差異が出にくかつたものと思われる。

3. むすび

以上のように、地表面からする普通の地震探査だけでなく、トンネルの掘削の進行とともに、種々な方法と考え方を併用すれば、断層・破碎帯を適確に予知することは可能であり、このような地質調査は今後各地でもつと活用されてしかるべきものと考ええる。しかしまだこれだけでなく、今後の改善点としては、例えば、

- 1) 既掘部分から弾性波を発生させて未掘部分へ送りこみ、その反射波をとらえて断層・破碎帯の存在を予知する。このことは新深沢トンネルで実験し、一応反射波はとらえられた。今後研究すべき分野である。
- 2) 切羽からの発破を地表面で受けるやり方は、トンネル施工基面より上の岩盤しか通らないためボーリング孔を施工基面より下げて掘削し、その底点を起震点とすることも考えられる。
- 3) ボーリング孔に垂直に受震器を展開し、この底点および地表でかけた発破をこの展開で受震することにより、断層面からの反射波をラインアップとしてとらえ、これから破碎帯の傾斜を求める等のことを検討する必要があると思われる。

終りに、この実験は、京都大学防災研究所教授吉川宗治博士の適切な指導と助言のもとに実施されたものであることを記し、こゝに厚く感謝する。

参考文献

- 佐藤忠五郎「岩盤掘削における対象岩盤の性質と調査法」
鹿島建設土木工務部「トンネルの岩盤力学実験報告書」

Prediction of Faults in Tunnelling by means of various Seismic Prospecting Methods

Kajima Construction Co., Ltd.

Chugoro SATO

Minami ICHIKAWA

Hakaru TAMURA

Ken ZAKO

Among various ways of Seismic Prospecting as methods of the ground reconnaissance at a tunnel site, one having the source of wave at the ground surface has been most extensively used. However, this method alone is not fully reliable to clarify the geological composition of ground when it contains complex faulting zones. In order to clarify the geological conditions around the tunnel formation in such a case, it is necessary to make a judgement collectively basing on results of various different methods, such as, a method of predicting faults by recording shocks of tunnel face blasting at the developed area on the ground surface and then investigating the propagation of elastic waves from the tunnel face to the ground surface that may tell how the wave has been reflected or refracted, how the amplitude has been damped and how the average velocity has been changed by faults.

In this paper, authors take the case of Kiso Tunnel for instance to review the effect of such reconnaissance by comparing its results with actual geological conditions revealed later as tunnelling proceeded, and they also present points that have to be improved in future.