

(67) 地山弾性波速度と切羽観察結果の関係について

佐藤工業(株) 正会員 ○大前 晋一 山本 松生
佐藤工業(株) 正会員 西野 治彦 稗田 肇

A Study on Connection the Seismic Exploration between the Observation of the Tunnel Face

Shin-ichi OMAE, Matsuo YAMAMOTO, Sato Kogyo Co., Ltd.
Haruhiko NISHINO, Hajime HIEDA, Sato Kogyo Co., Ltd.

Abstract

On tunnelling, the seismic velocity is one of the important parameter to evaluate the geological condition, so the seismic survey is widely made use of planing and designing the construction of tunnel.

However, it has been known that the result of the investigation is not always agreement with the geological condition, because tunnel is the linear structure in underground. So on tunnelling practically, it is necessary that the design is confirmed or modified with re-estimating the geological condition by the observation of the face and the measurement of the displacement.

We have made some experiments for predicting ahead of the tunnel faces with TSP ; Tunnel Seismic Prediction system, in the tunnels of the different geological conditions. This system can obtain the seismic velocity wiht predicting ahead of the face.

We verified the seismic velocity of the investigation comparing wiht that of TSP experiment, and examined the correspondence of the investigation to the geological condition, adding to the observation of the face or the rock tests.

1. はじめに

トンネル工事においては、地山弾性波速度 V_p が地山の良否を判定するうえで重要な指標の一つとなっており、計画段階の事前調査として地表から実施される弾性波探査(屈折法地震探査)は、工事計画、設計、積算などに広くに活用されている。

一方、トンネルは地中に構築される線状構造物であるため、事前調査から得られる予測結果が実際の地山状況と必ずしも一致しないことが知られている。そのため実際のトンネル工事においては、施工中の切羽観察や変位計測などから地山を再評価することによって、当初設計を確認・修正しながら工事を進めていくことが基本とされている。

筆者らは、トンネル切羽前方の地質予測を目的とした反射法地震探査の一つであるTSPシステム¹⁾による試験を地質が異なる数カ所のトンネルにおいて実施した。

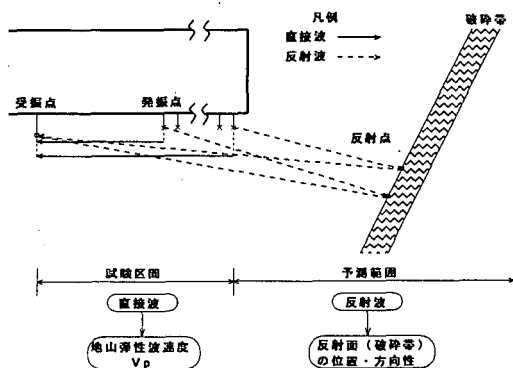


図-1 TSPシステムの概略

図-1に示すようにTSPシステムによる試験では切羽前方の地質状況が予測できるとともに、既施工区間（試験区間）の地山弾性波速度 V_p を得ることができる。そこで、施工中のトンネル坑内においてTSP試験により得た地山弾性波速度 V_p （直接波）と計画段階の事前調査で得られた地山弾性波速度 V_p とを比較検討するとともに、切羽観察結果や岩石試験結果などから実際の地山状況の確認を行った。

本報告では計画段階の V_p 、施工段階の V_p および実際の地山状況との関係についての検討結果を述べる。

2. TSPシステムによる試験の概略

TSPシステムによる試験の測定配置の概略を図-2に示す。図-2に示すように切羽後方約50m間に発振孔を1孔、受振孔を20～30孔設置する。発振孔および受振孔の深さは、トンネル掘削によるゆるみの影響があまり及ばないように1.5m以上確保

する。発振源にはダイナマイト25～35gと瞬発電気雷管を使用し、順次発破を行い、各発破の受振波形を記録する。記録した受振波形から初動走時を読み取り、測定区間の地山弾性波速度 V_p を計算する。

3. 検討内容

施工中のトンネルにおいてTSPシステムによる反射法地震探査を実施し、切羽前方の地質状況を予測するとともに、切羽後方の既施工区間（試験区間）の地山弾性波速度 V_p を測定した。これらのTSP試験を実施したトンネルを対象に、

- ①計画段階の事前調査により予測された地質状況や地山弾性波速度 V_p
 - ②TSP試験により測定された地山弾性波速度 V_p
 - ③切羽観察や岩石試験などにより得られた実際の地山状況
- を比較検討した。

4. 検討結果

TSP試験を実施したトンネルのうち、3ヶ所のトンネルでの検討結果を以下に示す。

4.1 検討事例1（Aトンネル）

4.1.1 試験区間での事前調査結果

Aトンネルでは事前調査として、地表からの弾性波探査がトンネル軸に沿った方向の測線とそれに交差する方向の測線で実施されている。Aトンネルの試験区間における事前調査結果の概略を図-3に示す。当該トンネルではTSP試験を2回実施している（試験区間1、試験区間2）。

事前調査によれば、試験区間1、試験区間2の地質はともに凝灰岩～凝灰質粗粒砂岩と推定された。

試験区間1では V_p は3.7～4.5km/sであり、試験区間内に速度境界部があると予想された。また、試験区間2には V_p が3.0km/s程度の低速度帯が存在すると予想された。

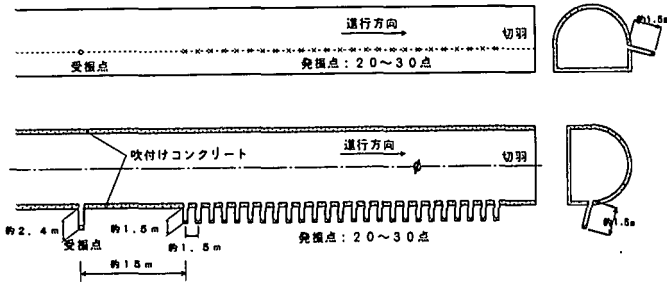


図-2 TSP試験の測定配置

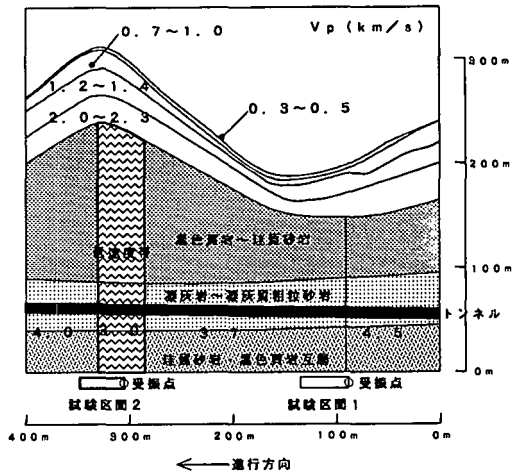


図-3 事前調査結果の概略（Aトンネル）

4.1.2 TSPシステムによる試験結果

試験区間1の初動走時記録を図-4に示す。試験区間1では受振点から35m付近に速度境界部が存在し、受振点から35m付近まではVpが4.8km/s、35~50m付近まではVpが3.7km/sとなっている。

試験区間2の初動走時記録を図-5に示す。試験区間2では初動走時のデータにばらつきが多く、複雑な岩盤状況を呈していると考えられ、当該区間の平均的なVpも1.9km/sと、かなり小さな値となっている。

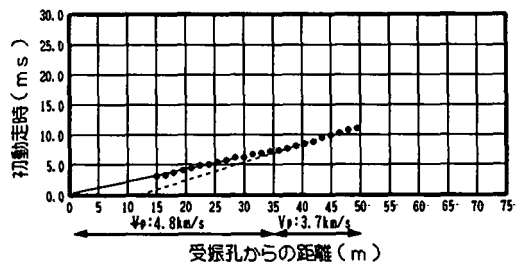


図-4 初動走時記録 (試験区間1)

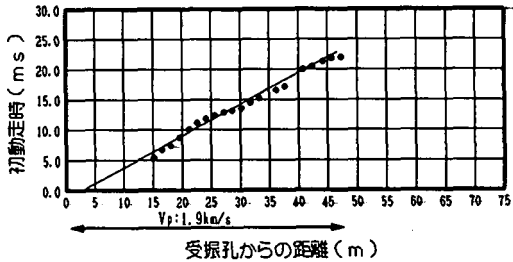


図-5 初動走時記録 (試験区間2)

4.1.3 実際の地山状況との比較

事前調査とTSP試験の結果および切羽観察結果との比較を図-6に示す。事前調査では試験区間1、試験区間2の地質はともに凝灰岩~凝灰質粗粒砂岩と予想されたが、切羽観察結果によれば、実際には黑色頁岩・珪質砂岩互層であった。

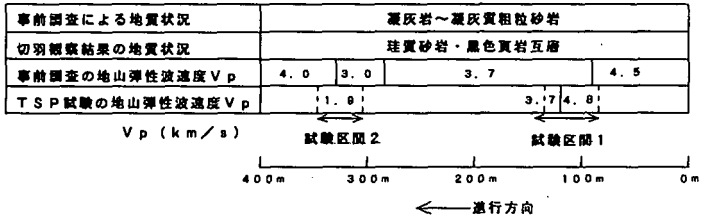


図-6 実際の地山状況との比較 (Aトンネル)

- 地山弾性波速度Vpについては、以下の傾向が認められた。
- (1)試験区間1については、事前調査とTSPによる試験結果はほぼ一致している。
 - (2)試験区間2については、事前調査で当該区間は低速度帯と予想されており、TSP試験の結果でもVpが1.9km/sと非常に小さな値となっており、破碎質でかなり地質状況の変化が激しいことが確認されている。

4.2 検討事例2 (Bトンネル)

4.2.1 試験区間での事前調査結果

Bトンネルでは事前調査として、地表からの弾性波探査がトンネル軸に沿った方向の測線で実施されている。また、測線上の一地点で垂直ボーリングを実施し、ボーリング孔を利用した孔内速度検層と扇射法弾性波探査を行っており、これらを総合検討し、地山弾性波速度Vpおよび地質状況を推定している。Bトンネルの試験区間における事前調査結果の概略を図-7に示す。当該トンネルではTSP試験を2回実施している (試験区間1、試験区間2)。

事前調査によれば試験区間1、試験区間2の地質はともに凝灰角礫岩と推定された。また、両試験区間の間に約40m規模の安山岩貫入岩の存在が予想

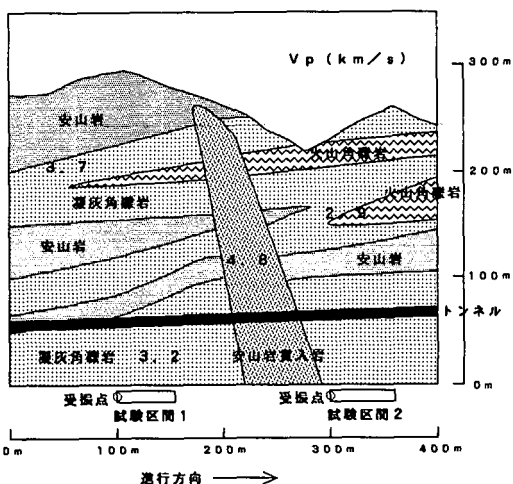


図-7 事前調査結果の概略 (Bトンネル)

された。

地山弾性波速度 V_p については、凝灰角礫岩の V_p は 3.2 km/s 、安山岩貫入岩の V_p は $4.4 \sim 4.8 \text{ km/s}$ と予想された。

4.2.2 TSPシステムによる試験結果

試験区間1の初動走時記録を図-8に示す。初動走時はほぼ直線上にあり、当該区間は均一な弾性波速度分布になっており、 V_p は 5.5 km/s である。

試験区間2の初動走時記録を図-9に示す。初動走時はほぼ直線上にあり、均一な弾性波速度分布になっており、当該区間の V_p は 5.4 km/s である。

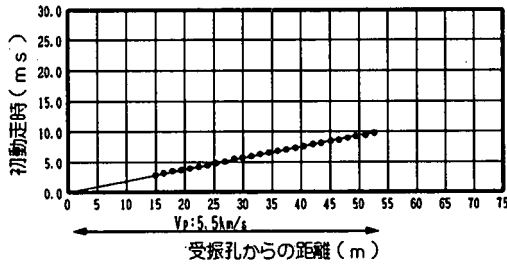


図-8 初動走時記録（試験区間1）

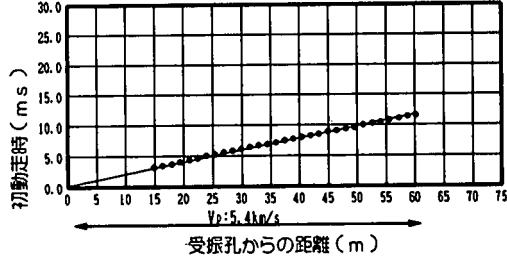


図-9 初動走時記録（試験区間2）

4.2.3 実際の地山状況との確認

事前調査とTSP試験の結果および切羽観察結果との比較を図-10に示す。事前調査では試験区間1、試験区間2の地質はともに凝灰角礫岩と予想されたが、実際の地質は堅硬緻密な安山岩溶岩であった。また、事前調査で予想された安山岩貫入岩は実際には存在しなかった。

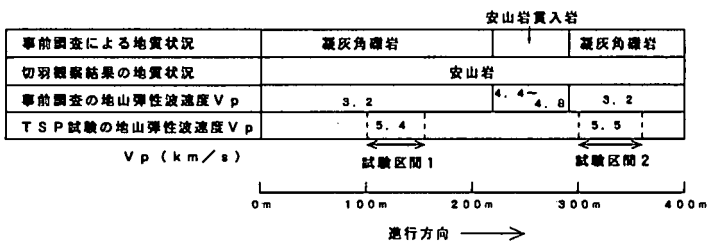


図-10 実際の地山状況との比較（Bトンネル）

地山弾性波速度 V_p については、孔内速度検層による安山岩溶岩部の V_p は 4.9 km/s 、事前調査で安山岩貫入岩が予想された付近での岩石コアの超音波速度試験による V_p は 5.7 km/s であり、ともにTSP試験による V_p に近い値となっている。

4.3 検討事例3（Cトンネル）

4.3.1 試験区間での事前調査結果

Cトンネルでは事前調査として、地表からの弾性波探査がトンネル軸に沿った方向の測線と坑口部付近でトンネル軸を横断する方向の測線で実施されている。Cトンネルの試験区間における事前調査結果の概略を図-11に示す。当該トンネルではTSP試験を1回実施している。

事前調査によれば、試験区間付近の地質は変質安山岩であり、受振点から40m付近までに断層破砕帯（破砕質～粘性土）が存在すると予測された。

地山弾性波速度 V_p については、変質安山岩の V_p が $2.3 \sim 2.6 \text{ km/s}$ 、断層破砕帯部の V_p が 1.7 km/s と予測された。

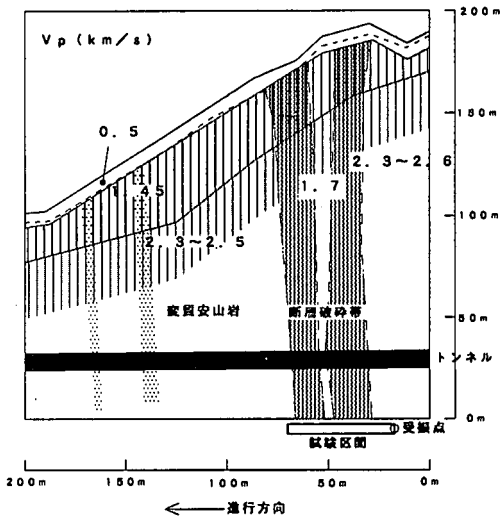


図-11 事前調査結果の概略（Cトンネル）

4.3.2 TSPシステムによる弾性波速度試験結果

試験区間の初動走時記録を図-12に示す。この試験区間では、受振点から25m付近と35m付近に速度境界が存在しており、受振点から25m付近まではVpが4.5km/s、25~35m付近まではVpが2.7km/sの低速度層となっており、35~50m付近まではVpが5.3km/sである。

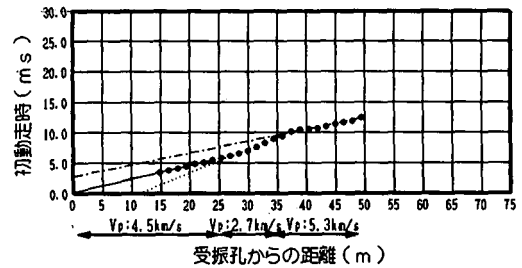


図-12 初動走時記録

4.3.3 実際の地山状況との確認

事前調査とTSP試験の結果および切羽観察結果との比較を図-13に示す。切羽観察結果によれば、試験区間の地質は変質安山岩を主体としており、亀裂を伴うが比較的硬質である。TSPによる試験で地山弾性波速度Vpが低速度層となる部分では、全体的に破碎されており、粘土化が進んでいる。

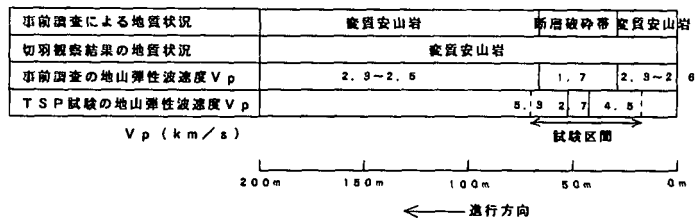


図-13 実際の地山状況との比較 (Cトンネル)

事前調査のVpはTSP試験によるVpと比べて、小さな値となっている。しかし、事前調査で試験区間内に予想された断層破碎帯の位置は、TSP試験で低速度層が確認された位置とほぼ一致している。

表-1 検討結果のまとめ

5. まとめ

3ヶ所のトンネルでの検討結果のまとめを表-1に示す。

Aトンネルでは、計画段階の事前調査と実際の地山状況で地質状況(岩種)は異なっているものの、事前調査の地山弾性波速度VpとTSP試験のVpはほぼ一致している。B

項目	計画段階	施工段階	地質状況
検討事例	① 事前調査のVp	② TSP試験によるVp	③ 実際の地山状況(切羽観察、岩石試験など)
Aトンネル	試験区間1 Vp: 3.7~4.5 km/s (凝灰角礫岩~凝灰質粗粒砂岩と推定)	Vp: 3.7~4.8 km/s 試験区間に速度境界層が存在	黒色頁岩・珪質砂岩互層
	試験区間2 Vp: 3.0 km/s (低速度層) : 4.0 km/s (凝灰岩~凝灰質粗粒砂岩)	Vp: 1.9 km/s	黒色頁岩・珪質砂岩互層 破碎質で地質変化が激しい
Bトンネル	試験区間1 Vp: 3.2 km/s (凝灰角礫岩)	Vp: 5.5 km/s	割れ目の少ない比較的堅硬な安山岩
	試験区間2 Vp: 3.2 km/s (凝灰角礫岩)	Vp: 5.4 km/s	溶岩 Vp: 4.9 km/s (速度換層) Vp: 5.5 km/s (岩石コア)
Cトンネル	Vp: 2.3~2.6 km/s (変質安山岩) : 1.7 km/s (断層破碎帯)	Vp: 4.5 km/s : 2.7 km/s (低速度層) : 5.3 km/s	弱風化の変質安山岩 断層破碎帯が存在 Vp: 4.5~5.3 km/s (岩石コア、変質安山岩) : 1.5 km/s (岩石コア、断層破碎帯)

トンネルでは、複雑な地質構造を呈しているため、弾性波探査による地質状況の想定に無理があり、事前調査の予測と実際の地山状況が異なっていたものと考えられる。Cトンネルでは、事前調査の地山弾性波速度Vpは、TSP試験によるVpより小さな値となっているものの、低速度層の位置はほぼ一致しており、事前調査により断層破碎帯の存在および位置を予測できているものと考えられる。

計画段階の事前調査における地表からの弾性波探査は、地形・地質条件によっては実際の地山状況と異なる場合もあることから留意する必要がある。TSP試験では、切羽前方の地質状況を予測できるとともに、既施工区間の地山弾性波速度Vpを正確に把握できるので、地山状況の再評価にも利用することが可能である。

今後も、地形・地質条件が異なるトンネルでのTSP試験を実施するとともに、一つトンネルにおいて連続的にTSP試験を実施していく予定である。また、TSPシステムを利用して、トンネル掘削によるゆるみの影響範囲の調査も進めていく所存である。