

弾性波によるトンネル切羽前方調査法の現地適用実験 (その3)

ー湧水を伴う断層破碎帯へのHSP法の適用ー

FIELD APPLICATION OF IN-TUNNEL HORIZONTAL SEISMIC PROFILING SYSTEM (PART 3)

- An Application of THSP System for the Detection of Fractured Zone with Water-flow -

大野 清¹・広野 進²・林 久夫³・原口 強⁴・中村康夫⁵

Kiyoshi OHNO, Susumu HIRONO, Hisao HAYASHI, Tsuyoshi HARAGUCHI and Yasuo NAKAMURA

The authors applied tunnel horizontal seismic profiling system to the fractured zone with water-flow. The geology of test tunnel are slate, chert, basalt, and alternation of these rocks. There are many irregular fractures, small blocks, and joints with white-clay in the fault. The face of tunnel is extremely unstable.

We setted many sensors at the side-wall of both main tunnel and pilot tunnel, and had carried out seismic records to evaluate more extensive geological structure.

The distance for the fault of the zone surrounding and ahead the face was detected by reflection method.

Key words: seismic wave, reflection method, fault, geological structure

1. まえがき

現在の地質調査レベルでは、山岳トンネル工事における切羽前方の地質状況を精度よく予知することは極めて困難であり、切羽崩壊、突発湧水等掘削時の切羽トラブルの発生が予想される。今後、トンネルの大断面化が進み急速施工が要請されるにあたって、工事を安全かつ能率的に遂行する上で、切羽前方の精確な地質情報の把握は必要不可欠になると考えられる。

本研究は、弾性波によるトンネル切羽前方調査法の実用化にあたり、将来的に最も重要となる湧水を伴う断層破碎帯の予測を行うことを目的に、HSP法を実トンネル切羽へ適用し検証を試みたものである。実験を行った中部縦貫自動車道安房トンネルは、北アルプスの南部、乗鞍火山帯の中央付近に位置し、火山活動に伴う高熱帯と有毒火山性ガスの噴出、熱水帯、火山噴出物の堆積した低速度帯及び湧水を伴う断層破碎帯等の劣悪地質が予想されたため、本坑施工に先立って調査坑が並行して掘削されており、ここで遭遇した断層破碎帯に着目して予測を行ったので、その結果について報告する。

-
- | | | |
|-------|----|-------------------------------|
| 1 正会員 | 工博 | 鹿島建設(株)土木技術本部工務部 |
| 2 正会員 | | 鹿島建設(株)技術研究所 |
| 3 | | サンコーコンサルタント(株)技術課 |
| 4 | | 復建調査設計(株)地質調査部 |
| 5 正会員 | | 建設省土木研究所環境部地質研究室 トンネルHSP共同研究会 |

2. 実験トンネルの地質

2.1 地質概要

本地域の地質は美濃帯の中生層を基盤とし、中生代から第三紀の貫入岩を伴い、これを覆うように第四紀の火山噴出物、扇状地堆積物等が広く分布する。

今回実験対象にした中の湯工区の地質（図-1参照）は、基盤の中生層が分布し主として泥質・シルト質基質のメランジェ（混合岩体）から構成され、ブロックとして様々なサイズの砂岩・チャート・玄武岩・石灰岩を含むゾーンである。TD1500～TD1700付近の切羽の観察では基質である粘板岩とチャートの互層が主体で、部分的に玄武岩、砂岩が認められる。岩質は全体に悪く、粘板岩には小断層が発達し粘土を挟み、層状チャートは細かく破碎されブロック化していることが多い。

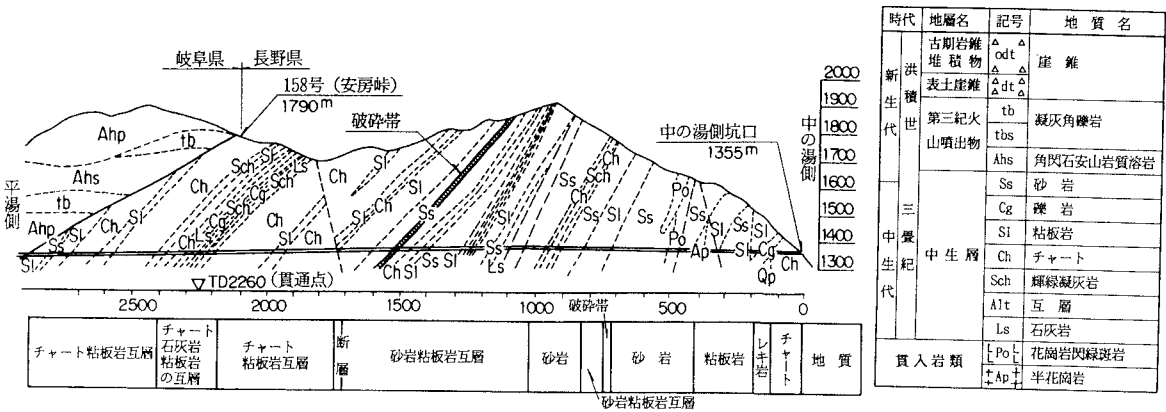
2.2 調査坑での断層破碎帯の状況と対策

事前の調査ボーリングでTD1600付近に幅20m程度の断層破碎帯（湧水圧18kgf/cm²、湧水量2,000l/min）の存在が確認されたため、対策として注入を実施することとした。断層部の破碎状況は、割れ目が発達し節理面に粘土を介しブロック状に破碎されており、一部礫状を呈するとともに白色粘土化した破碎帯も見られた。切羽は湧水を伴い極めて不安定な状態であった。

注入方法は、一度に延長50mの範囲を薬液注入（LW）により改良し、止水ゾーンを形成した後に掘削したが、残存湧水を伴う切羽崩落に何度も見舞われ、掘削工法（全断面掘削から上下半掘削へ変更）や支保パターンの変更、先受工（鉄矢木、斜めボルト）、鏡止め、仮巻コンクリート等の種々の補助工法を併用し、最終的にはNATMから矢板工法へ変更してこの断層破碎帯部を突破した。

調査坑での施工結果を踏まえ、本坑掘削に先立ち断層破碎帯部の対策として、調査坑貫通点から横坑を掘削し、本坑断面内に水抜き坑を兼ねた底設導坑を迎え掘りし、この導坑より破碎帯部に向けて注入を行い地山改良ゾーンをトンネル周辺に形成し、本坑掘削に備えた。

したがって、HSPの計測は切羽前方に底設導坑とトンネル周辺に地山改良ゾーンが存在する条件（図-2参照）で実施することとなった。



図－1 安房トンネル（中の湯工区）地質縦断

3. 現場計測

3.1 測線配置

図-2に安房トンネルで実施したHSPの測線配置を示す。通常トンネル本坑におけるHSPの計測は、切羽に対して受振点と発震点は同一直線上に配置されることとなるが、安房トンネルでは本坑に調査坑が並行して掘削されているため、受振点と発震点を両坑に設置することにより、より広い範囲の反射面の検出が可能と考えられる(図-3参照)。また、事前の地質予測では、トンネル進行方向に対して断層破砕帯が左坑壁手前から右奥に斜交すると予想されたため、受振点と発震点をいずれも左側の坑壁に設けた。受振器は、本坑、調査坑とも2mピッチに24点ずつ計48点配置し、中継線を経て連絡坑の観測本部に接続した。発震点は、本坑に4点、調査坑に6点設けた。

3.2 計測方法

受振点の設置は、本坑では径10mm、長さ100mm程度の小孔に受振器のスパイクを差し込み石膏で固定した。調査坑では床板コンクリートに径42mm、長さ500mm、傾斜約60°の受振孔を削孔し、受振器に鋼棒(長さ70cm)をつけて挿入し石膏で固定した。発震点の設置は、本坑、調査坑とも径42mm、長さ2m、傾斜30~45°の装薬孔を削孔し、薬量は受振点より近い場合は30g、遠い場合は60gを用いた。

発破による地震波は、48チャンネルのデジタル記録器で収録し、サンプリング間隔は125 μ s、レコード長2,000ワードで行った。表-1に計測に用いた主要機器の仕様を示す。

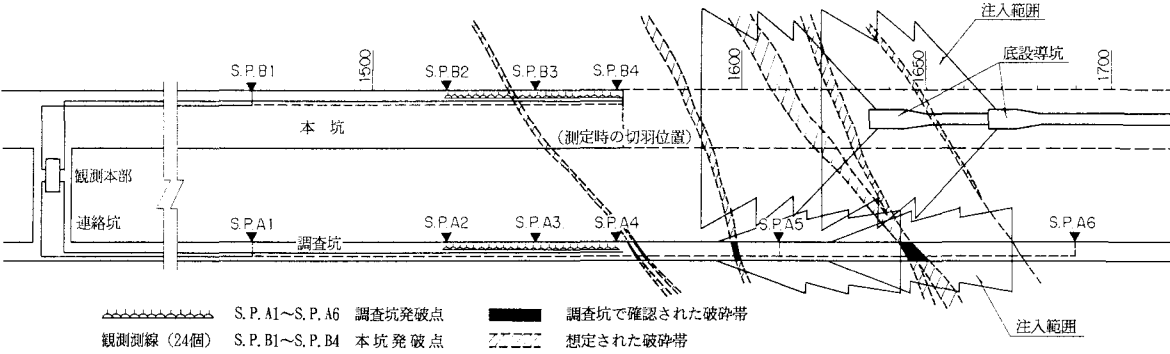


図-2 HSP測線配置

表-1 主要計測機器

装 置	仕 様
デジタル記録器	チャンネル数 : 48
	A/D 変換 : 18bit
	ダイナミックレンジ : 113dB
	サンプリング間隔 : 31.25, 62.5, 125, 250, 500, 1000, 2000 μ s
	出力形式 : 32bit
受振器 L-25E	固有周波数 : 40Hz
発火器 GB-110A	発火方式 : 高圧蓄電
	ショットマーク : 発火電流発信

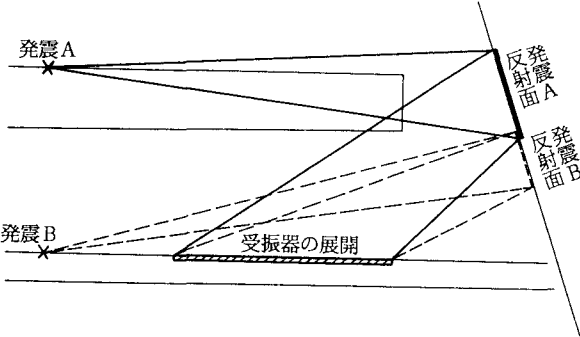


図-3 反射面の検出範囲

4. H S Pによる解析

4.1 地山速度、ゆるみ領域の解析

トンネル周辺の地山弾性波速度（ V_p ）及びゆるみ領域を求めるため、屈折法による直接波の解析を行った。図-4に本坑及び調査坑周辺の速度解析結果を示す。

本坑新鮮部の地山速度は $5.5 \sim 4.5 \text{ km/s}$ で、中間部に 3.0 km/s 程度の低速度帯が存在する。この区間は本坑掘削時にロックボルトの増打ち（TD1550付近では左右の肩部から側壁部にかけて、TD1560付近では左側壁部を補強）を実施した箇所とほぼ一致している。調査坑では $V_p = 5.5 \sim 4.6 \text{ km/s}$ と低速度帯の存在は検出されなかった。トンネル周辺のゆるみ領域は、本坑で $2 \sim 4 \text{ m}$ （ $V_p = 2.5 \sim 1.9 \text{ km/s}$ ）、調査坑で $2 \sim 3 \text{ m}$ （ $V_p = 2.6 \sim 2.2 \text{ km/s}$ ）程度であった。

ここで求めた地山速度、ゆるみ領域は、後述するH S Pの解析処理の過程において、反射面の位置の確定及び深度走時補正に用いた。

4.2 解析方法

収録した地震波は、周波数分析、ノイズ除去、反射波抽出、マイグレーション等の一連の波形処理を行い、以下の方法によりトンネル前方の反射面の分布を求めた。

今回の解析では、図-5に示す方法で行った。すなわち、発震点から出た地震波がある点で反射して受振点に戻る軌跡を、幾何学上の発震点と受振点を焦点とする楕円の方程式で仮定すると、ある反射波に対応する反射面は複数の発震点、受振点の組による楕円群に共通な接線として求められる。

したがって、反射面の位置（発震点から反射点を経由して受振点までの距離から求められる）は、P波速度と地震波の到達時間から容易に算定することができる。

ここでは、全受振点の地震波のサンプル毎に楕円を描き、平面上に設定した2m間隔の格子点に反射点が一致したときにその波形振幅を加算することにより、反射点の振幅の大きさを計算しコンター表示することとした。

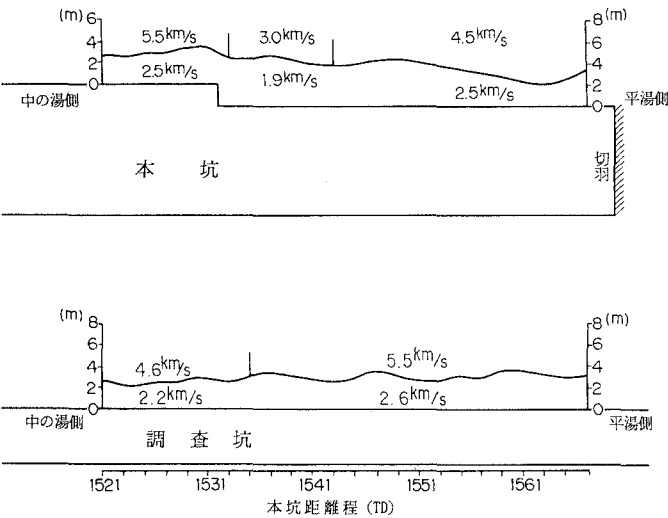


図-4 地山速度、ゆるみ領域の解析結果

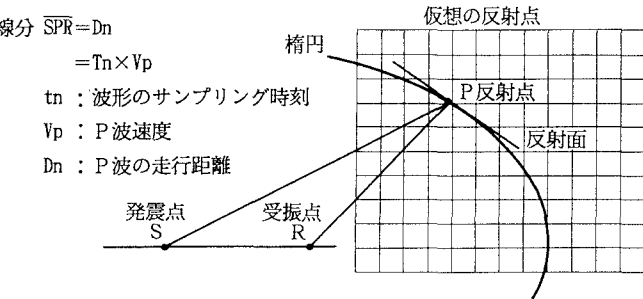


図-5 反射面の位置と分布

5. 地質構造とHSP解析結果

5.1 地質構造の評価

調査坑及び本坑での地質観察結果から、試験区間の地質構造を復元して図-6に示す。地層の方向としては局所的にばらつくが、ほぼ西北西－東南東の走向で南へ50～80°傾斜しており、切羽に対して“さし目”となっている。断層は調査坑で認められたものがそのまま本坑に現れるのではなく、これを切る幾つかの断層によって断ち切られている。断裂系として、東－西、西北西－東南東、北北東－南南西の短い物もあるが、全体としては地層方向に斜交する北北東－南南西の断層に分断され少しずつシフトしながら、地層分布にはば調和的な方向へ破碎帯の幅は膨・縮するものの連続している。

主な断層としてF-1～F-4があり、このうちF-3断層は湧水を伴う大規模な破碎帯を形成し、調査坑施工時には種々のトラブルが発生した。当地域の破碎帯の工学的特徴として、粘板岩は粘土化して不透水層を、チャートは細礫化して透水層を形成していることが多い。

5.2 HSP解析結果の評価

図-7に調査坑で発震し本坑で受振した波形から求めたHSP解析断面を示す。図中のコンターは反射面の相対強度±6以上の部分を表しており、黒く塗りつぶした部分は岩質が硬→軟へ変化する反射面を示し、断層破碎帯からの反射と想定される。

解析結果から検出された①～⑥の6箇所のイベントについて実際の地質構造との比較を以下に示す。

- ①…本坑TD1595付近；調査坑から連続する断層破碎帯で、F-2断層の延長と判断される。調査坑TD1575で注入残存湧水が粘土層にまわり切羽が崩落した断層破碎帯に相当し、本坑においては事前注入域の先端部で地質が悪くフォアパイリングを施工した。
- ②…本坑TD1625右、側方；注入孔の探りボーリングで破碎帯と想定された部分で切羽での確認はされなかったが、F-3断層の延長の可能性も考えられる。
- ③…調査坑TD1620付近；調査坑で遭遇した最大規模の破碎帯で、F-3断層に一致する。破碎帯での全断面掘削は不可能となり上下半の2分割で掘削した。ロックボルトの打設も不可能となり鋼支保工H-150を建込み一部鉄矢木による縫地を行いながら施工した。
- ④…調査坑TD1640付近；10m程度の距離のズレを考慮すればF-4断層とも考えられる。
- ⑤…本坑TD1620左、側方；切羽での破碎帯の確認はされなかったが、本坑において事前に注入を実施した区間で、湧水もほとんど無く、注入区間外に比べて注入区間内の変位は小さく抑えられており、地山改良の効果が現れていたものと考えられる。F-3断層の延長の可能性も考えられる。
- ⑥…調査坑TD1560付近；チャートのレンズ状ブロックの分布と一致しているが、破碎はされていない。F-1断層とF-2断層のほぼ中間地点に位置する。

6. まとめ

今回の実験では、とくに顕著な反射面（大規模な断層破碎帯）の存在を検証することはできなかった。実際の施工状況においても、本坑掘削時は調査坑に比べて大きなトラブルもなく施工されている。HSPの解析結果から得られたイベントについては地質との対応は見られるものの、施工に影響を及ぼす程の反射面ではなく、事前の対策による水抜き効果（底設導坑）や注入効果が地山改良に寄与していたと推測される。

今後、HSPの精度向上、実用化を進めるにあたり、以下の課題について検討を行う必要がある。

a. 計測手法の精度向上…多成分（2，3成分）受振器による波動伝搬方向の推定

高い周波数域での測定と高速A/D変換の採用

起震時刻の読取精度の向上と発破に替わる発震源の開発（測定の再現性）等

- b. 解析手法の精度向上…反射面の走向傾斜を精度よく再現できる解析法
- c. 反射波の強度と断層破碎帯の規模との関係…切羽の自立、支保への影響等の評価法
- d. H S Pの適用性の把握…適用地山条件の整理、先進調査ボーリング等の他の調査法との使い分け
- e. 現場計測、解析処理の迅速化…施工サイクルに及ぼす影響を最小限に止めるとともに施工へのフィードバックを円滑に行う。

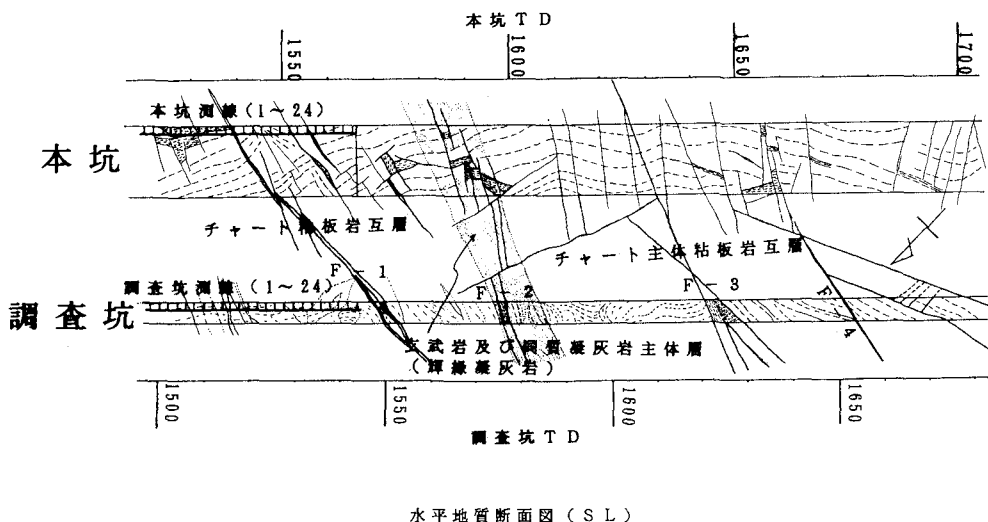


図-6 試験区間の地質構造

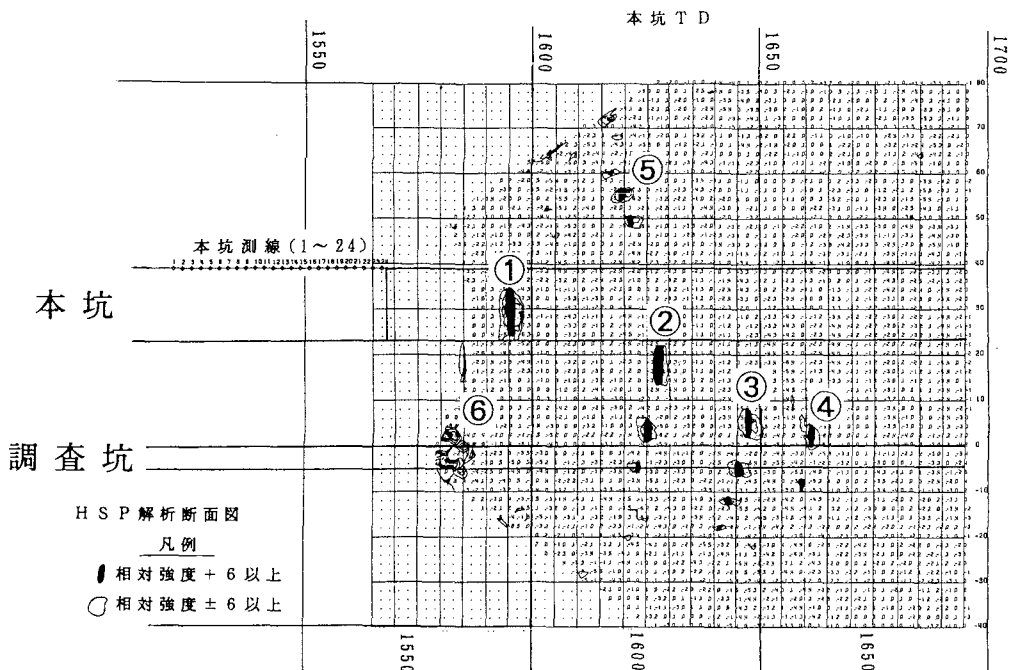


図-7 H S P解析断面