

複雑な堆積地盤におけるトンネル切羽前方探査の適用

APPLICATION OF EXPLORATION LOOKING AHEAD OF TUNNEL FACE IN COMPLICATED SEDIMENTARY GROUND

田中一雄¹⁾・山田敏之¹⁾・大友 譲²⁾・中村 真³⁾・芦田 譲⁴⁾

Kazuo TANAKA, Toshiyuki YAMADA, Yuzuru OHTOMO, Makoto NAKAMURA and Yuzuru ASHIDA

Recently, high reliability of the construction technology and high speeding of the construction are required to resolve the problems caused by large section and dilation of the tunnel structure. Prediction of the forward geological condition under excavating tunnels is important. So, the exploration looking ahead of tunnel face, such as TSP (Tunnel Seismic Prediction) and/or HSP (Horizontal Seismic Profiling) is carried out.

In the present paper, the new survey method looking ahead of tunnel face was proposed, and applied to the sedimentary ground.

Key words : tunnel, excavation, geological survey, Horizontal Seismic Profiling, sedimentary ground

1. はじめに

近年、トンネル構造物の大断面化、長大化の傾向に伴い、施工技術の信頼性や施工のスピード化が要求されている。トンネル掘削において切羽前方の地質形態や地山条件を知ること、すなわち、断層や破碎帯あるいは含水層の存在の予知は、設計・施工の安全性や効率性の観点から非常に重要なことである。そのため、近年、TSP (Tunnel Seismic Prediction) や HSP (Horizontal Seismic Profiling) と呼ばれる弾性波探査が実施されている。これは石油・天然ガスの探査の分野で開発されたビットを震源とした前方探査である VSP (Vertical Seismic Profiling) 技術をトンネル切羽前方探査に応用したものである¹⁾。

トンネル切羽前方探査において重要な点は現場におけるデータ取得から解析結果の出力までの期間短縮である。特にデータ取得時ではトンネル掘削作業を中断することなくデータを取得し、そのデータを現場事務所のコンピュータで処理・解析し、切羽が調査地点に到達するまでに必要な対策が検討できるように、2～3日間で切羽前方の地山状況を把握することができるのが最も望ましいことである。

従来の TSP 探査では、複数の発振源を用いるため調査時にはトンネル掘削作業を中断して調査を行う必要があった。また、一般に用いられる受振器では検出される波形が1成分のため、反射面の方向が特定できず、しばしば虚像が現れることがあった。

今回用いる HSP 手法は、以上の観点からトンネル切羽前方探査の実用化を目指し、以下の点を改良した。

- ①通常の掘削のための発破を震源として用いて、施工サイクルを極力乱さない。
- ②受振器を3成分取得とし、反射面の方向が特定できるようにする。
- ③プログラムの作成をはじめ、解析処理作業のシステム化を図る。

ここでは、本システムの実用性を検証するために、複雑な堆積地盤に適用した事例について報告する。

-
- | | | | |
|----|----------|-------------|-----------------------|
| 1) | 関西電力株式会社 | 中央送変電建設事務所 | 大阪北部地中送電線工事事所 |
| 2) | 正会員 | 株式会社ニュージェック | 東日本事業本部 河川・海岸部 ダム・砂防室 |
| 3) | 正会員 | 株式会社ニュージェック | 西日本事業本部 業務企画室 |
| 4) | 正会員 | 京都大学大学院 | 工学研究科 資源工学専攻 |

2. トンネル経過地の地質概要

トンネル経過地は、図-1 に示す大阪府箕面市と茨木市の境界付近、千里丘陵から北摂山地の南縁にかけての地域に位置する。調査地域を構成する基盤岩は、中生代ジュラ紀の丹波層群と、白亜紀後期に丹波層群に貫入した貫入岩の岩脈である。これらの基盤岩を新生代第四紀更新世の大阪層群下部層と完新世の未固結堆積物が被覆している。丹波層群は、頁岩および砂岩頁岩互層、砂岩および砂岩頁岩互層、頁岩を伴うチャート、石灰岩を伴う塩基性火山岩より構成されている。

調査地付近の地層の一般的な走向は東北東—西南西で傾斜は高傾斜である。また、調査地の北側には、丹波層群を貫く形で中生代白亜紀後期に進入した茨木複合花崗岩体に属する黒雲母花崗岩等が分布している。丘陵地では、これらの基盤岩を大阪層群の下部層が被覆している。トンネルの掘削に影響を及ぼす可能性のある断層は、箕面断層と馬場断層である。

さらにトンネル経過地では、上記の断層から派生した数多くの小規模な断層が存在し、図-2 に示すように複雑な地盤となっている。

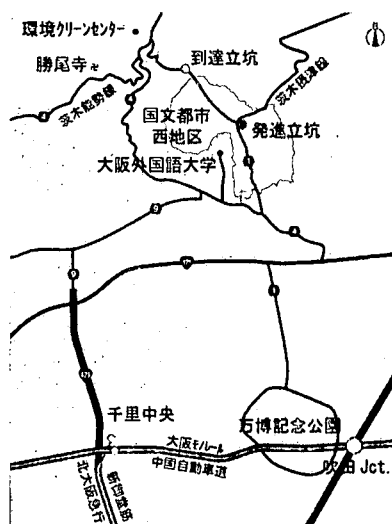


図-1 トンネル経過地の位置

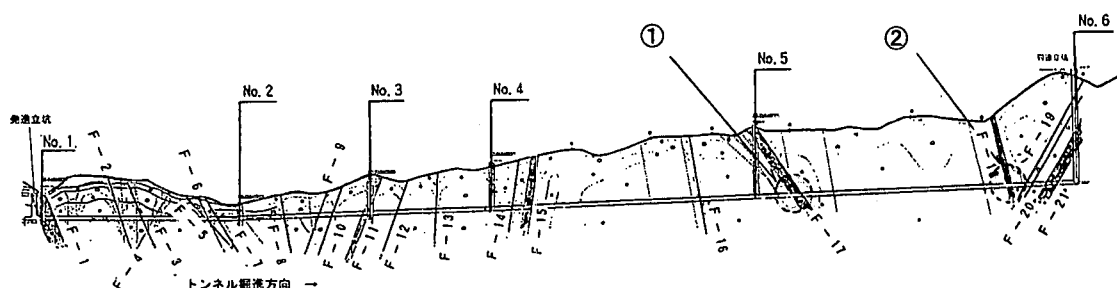


図-2 事前調査によるトンネル経過地の断面

3. トンネル切羽前方探査の概要

トンネル切羽弾性波探査では、図-3 のようにトンネル内の震源から弾性波を発生させ、切羽前方の地層境界から反射波を、同じくトンネル内に設置した受振器で記録する。一般に行われている弾性波探査においては、受振器で得られる情報は時間変化に対して、地動に応じた振幅値として表される。しかし、切羽前方の反射面の位置を推定するには、切羽からの距離に対して、振幅値の変化を用いて切羽前方の地山状況をイメージする必要がある。石油・天然ガス探査で多用される反射法地震探査における中核的な技術である CDP 重合法の適用は、トンネル切羽前方探査では実際上不可能である²⁾。そこで本手法では、等走時面を利用したイメージング技術を用いる。

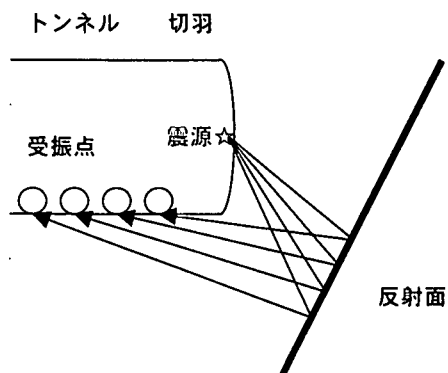


図-3 切羽前方探査のイメージ

本手法では、反射点は震源と受振点からの距離の和が一定である点の軌跡上にあるとして導出している²⁾。ここで、反射波の速度として平均速度を用いると、震源と受振点からの距離の和が一定ということは、走時が一定である軌跡上、つまり反射点は等走時面上の点になるといえる。

この等走時面は3次的には楕円体の表面として表現できる。したがって、図-4に示すように一つの震源と複数の受振点の組に対して等走時面を描けば、それらの共通接面が反射面といえる。

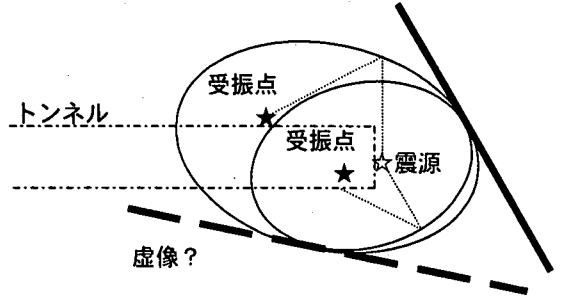


図-4 楕円体の共通接面による反射面推定のイメージ

さらに、1成分受振器記録を用いたイメージングでは、1方向から伝播する波の振幅値のみを使ってイメージングを行うため、反射波の入射方向がわからない。そのため、真の反射面ではなく虚像が生まれる場合がある。また、トンネル軸方向以外の情報も含まれている可能性がある。これらの問題を解決するために、3成分受振器で波形を取得した。3軸方向からの記録から、受振点で観測された波の入射方向を推定することで、等走時面上の反射点周辺付近のみの振幅値を強調(重み付け)することが可能となる。

4. HSP調査概要

本調査では、図-2に示す2箇所の地質不良帯を対象に実施した。受振器は、切羽から約20m離れた位置からトンネル両側面に5mピッチで各8点設置した。受振器用鋼棒を設置するに際しては、壁面近傍の岩盤の緩みの影響を避けるため削孔はドリフターを用いて1.0mの鋼棒を設置した。鋼棒の定着には、グラウト用モルタル(デンカ製プレタスコン)を用いた。データの取得には、48chのデータロガー(応用地質製 McSEIS-SX48)を用いた。測定装置の諸元は表-1に示す通りである。調査では、測定直前に受振器を取り付けトンネル掘削時の発破に備えた。各調査での受振器位置および震源等の諸元を表-2に示す。

表-1 測定器の諸元

データロガー McSEIS-SX48	成分数	1,3,6,12,24,48成分
	入力インピーダンス	20kΩ
	利得	16,32,64,256,1024倍
	周波数特性	10～4600Hz
	ハイカットフィルタ	48,64,96,192,384,768,1563Hz
	A/D分解能	18bit
	サンプリングレート	25,50,100,200,500,1000,2000μs
	メモリアイス	1024,2048,4096,8192ワード
	ブリティグ	0(OFF),128ワード
受振器 GS-14-L3	入力レベル	100～1000mV
	成分数	3成分(X,Y,Z)
	受振器感度	290mV/ips
	共振周波数	28Hz
	出力抵抗	570Ω

表-2 調査位置の諸元

箇所	震源	切羽	受振点	対象変質帯(事前調査)	
①	芯抜き発破 (薬量約2kgf)	TD.1205m	TD.1155～1190m	TD.1260～1280m	F-17 破碎帯
②	芯抜き発破 (薬量約3.2kgf)	TD.1653m	TD.1595～1630m	TD.1690～1700m	F-18 破碎帯

発破後直ちに波形等を確認し、得られたデータの妥当性を確認した。図-5に解析のフローチャートを示す。解析ではまず、受振点付近の地山の速度構造が均一であると仮定して、記録上で直接波の初動走時を読み取り、弾性波伝播速度を4500m/secとした。デコンボリューションフィルタには、地層の非弾性により伸長した波形をインパルスに短縮し、分解能を向上させるホワイトニングデコンボリューションと、記録中に含まれる周期性を持つ繰り返し現象を、その周期性を利用して予測し、元の記録から差し引くことにより繰り返し現象を除去する予測デコンボリューションがある。バンドパスフィルタとは、スペクトル解析結果から信号成分と雑音成分の周波数成分の違いを把握して、雑音成分を除去するフィルタである。さらに、AGC処理とは、球面発散、透過損失、吸収効果により減衰した波形の振幅値を補正する処理である。

図-6に①箇所取得したデータを、図-7に②箇所取得したデータ示す。トンネルの掘削では段発発破を使用したので、100msec付近で2回目の反射波が確認できる。特に、②箇所での波形のほうが明瞭である。これは、調査位置での岩盤が、②箇所のほうが良好で、1段発あたりの薬量が多かったためである。本手法での調査範囲は100m程度であるため、取得したデータのうち使用するのは、50msec程度までである。データ取得後は直ちに解析を行い、反射面の有無を確認した。解析に要する時間は30分以内である。データの確認後、解析結果および既存調査資料等により最終評価を行った。

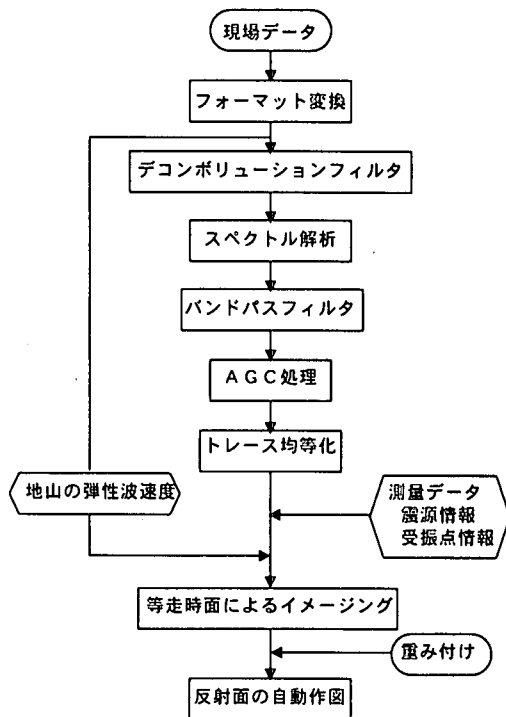


図-5 解析フローチャート

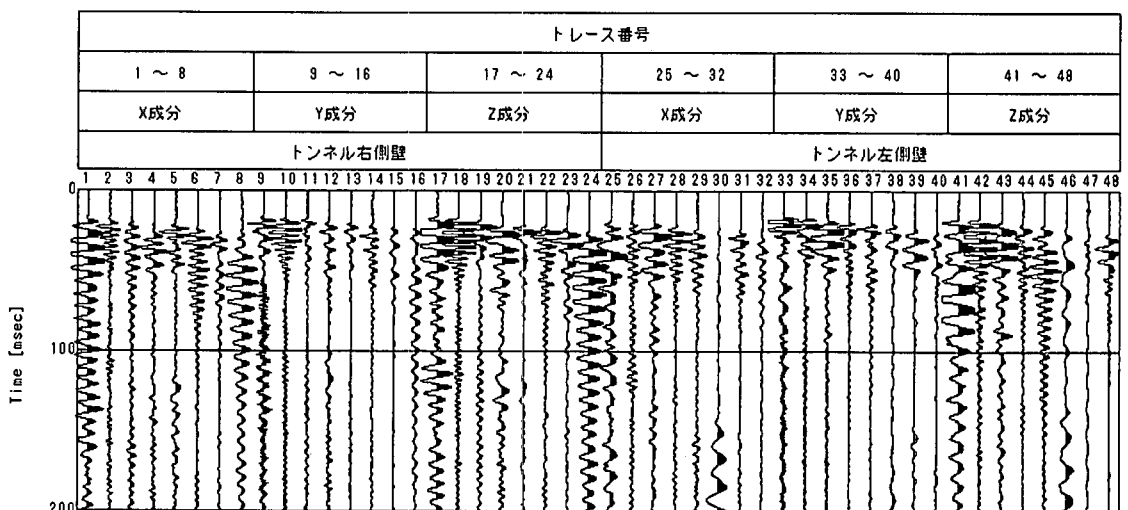


図-6 取得した波形データ (①箇所)

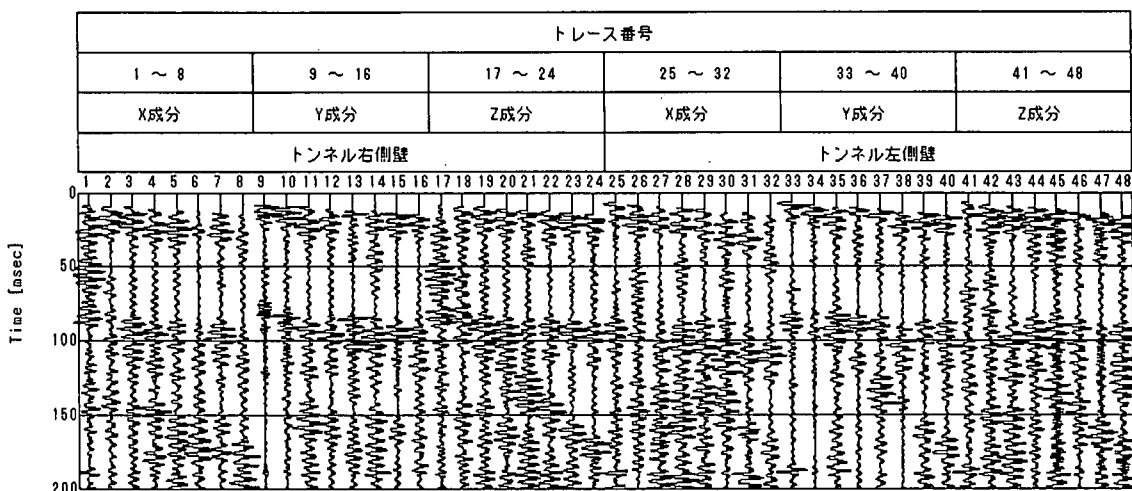


図-7 取得した波形データ (②箇所)

5. H S P解析結果

図-8 に①箇所での調査結果を示す。解析の結果、TD.1245m~1260m 付近と TD.1290m~1300m 付近に低速度帯を検出した。低速度帯の評価基準としては、低速度帯の始まりと終わりの2つの反射面が組で存在することとした。また、検出した低速度帯のうち事前調査でその存在が推定されているものは断層、それ以外のものを岩盤不良帯と称する。推定位置での施工の結果、調査時に推定した反射面①②間の低速度帯が、推定位置の TD.1290m 付近で出現した。TD.1255m 付近の地盤が若干悪い機械掘削の領域は、解析結果における反射面(a)(b)間の低速度帯と考えられる。低速度帯の幅は、受振点付近の岩盤の良い領域の弾性波速度を用いて解析しているため推定結果の方が広く、概ね2倍程度である。

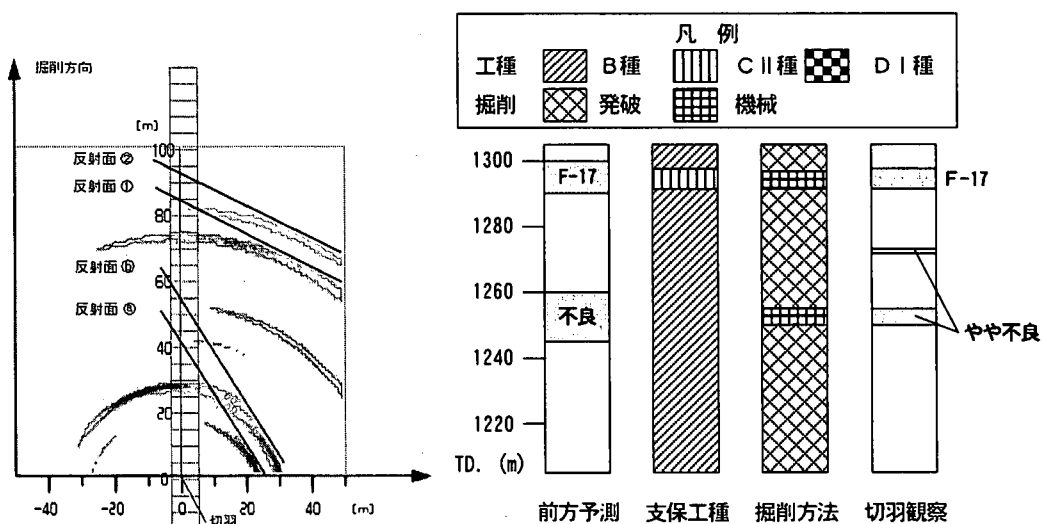


図-8 HSP 探査結果と施工実績との比較 (①箇所)

図-9 に②箇所での調査結果を示す。解析では、TD.1670m～1680m 付近と TD.1690m～1700m 付近に低速度帯を検出した。さらに、低速度帯の背面は不明であるが、TD.1705m 付近に低速度帯の始まりの反射面が認められる。施工時には、F-18 到達前にほぼ予想通りの位置と規模で岩盤が悪くなる区間が存在した。F-18 断層の始まりの位置はほぼ予想通りであったが、背面と次の岩盤不良帯の境界は実施工では不明瞭であった。実施工の結果、F-18 断層の幅は約 30m と大規模であったため、HSP 探査では断層の規模の推定が困難であった。さらに、F-18 断層の岩盤は極端に悪くなかったため、明瞭な反射面が得られなかったと考えられる。

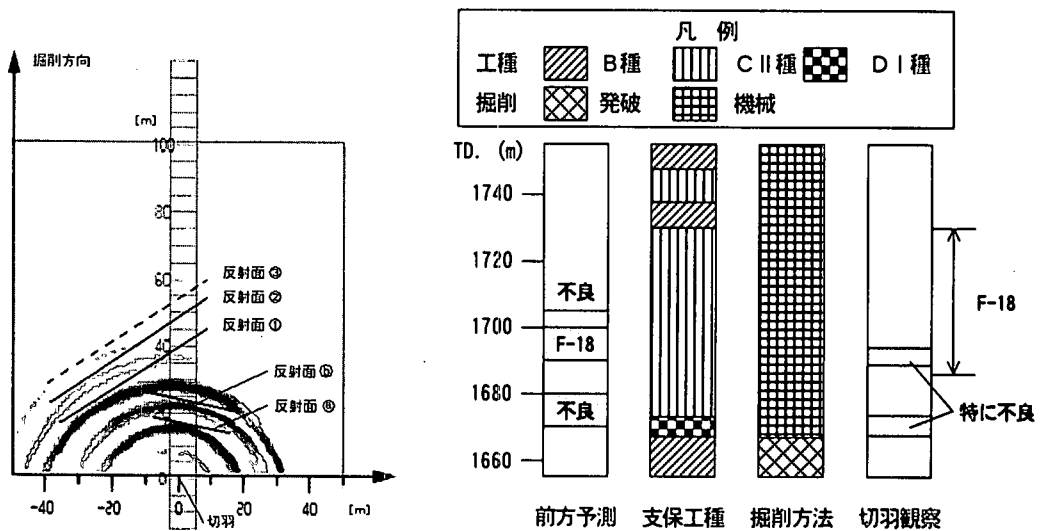


図-9 HSP 探査結果と施工実績との比較 (②箇所)

6. おわりに

本調査において、①箇所のような明瞭な反射面に対する推定精度は高いことがわかった。さらに、②箇所において複数の低速度帯がある場合でも、調査位置の岩盤が良好であれば2つ目の低速度帯の始まりの反射面までは精度よく推定できた。このことより、本手法はある程度良好な岩盤であれば、断層の有無および出現位置の予測に有効であるといえる。

なお、HSP 調査で推定した低速度帯の幅は、調査位置での健全な岩盤の弾性波速度で評価するため実際の結果より広がるが、低速度帯の幅の定量評価は今後の課題である。

参考文献

- 1) 芦田 譲：トンネル切羽前方探査の可能性と今後の展望，トンネル切羽前方探査に関するシンポジウム・講演会，pp.1-7，2000.
- 2) 芦田 譲・佐々 宏一：坑井間反射法地震探査データの深度変換，物理探査，第 46 巻，第 3 号，pp167-174，物理探査学会，1993.