

(105) 弾性波を用いた既設水路トンネルの位置推定

西松建設(株)技術研究所 正会員 ○平野 享, 明石 健, 戸松征夫
建設省土木研究所 正会員 中村康夫
京都大学工学部資源工学科 芦田 譲

The prediction of formerly excavated tunnel location use of seismic reflection method.

Toru HIRANO, NISHIMATSU CONSTRUCTION Co., Ltd.
Takeshi AKASHI, NISHIMATSU CONSTRUCTION Co., Ltd.
Yukio TOMATSU, NISHIMATSU CONSTRUCTION Co., Ltd.
Yasuo NAKAMURA, MINISTRY OF CONSTRUCTION
Yuzuru ASHIDA, KYOTO Univ.

Abstract

In the present paper, the prediction of formerly excavated tunnel location by use of seismic reflection method is described. A new technique that we called Tunnel Seismic Prediction (TSP) was developed to look ahead of tunnel face by Amberg M. T. In the field measurement, the several shot hole are placed along the horizontal tunnel. The geophone specialized for this purpose is placed into the one receiver hole. The seismic disturbance by shooting are recorded digitally by recording instrument. The observed data are processed by on site computer. Among the various kinds of data processing techniques, band pass filter, stacking and diffraction migration are applied to enhance S/N ratio and to reconstruct the reflection planes. The seismic velocity data necessary to data processing was obtained from the travel time of first arrival wave and the distance between the shot point and geophone.

The proposed technique was applied in order to predict the precise location of formerly excavated tunnel during excavating a new tunnel. Judging from the good agreement between the prediction and the excavated result, it was clarified that the proposed technique might be applicable to relatively simple geological structure.

1. はじめに

既設トンネルに接続する新規トンネル掘削工事において、既設トンネルとの位置関係を調査する必要がある。既設トンネルのおよその位置は分かっていたので、施工計画では掘削が既設トンネルに接近した段階でボーリングによる探査を行い、既設トンネルの位置を確かめつつ機械掘りを行うと決められた。その後そのとおり工事は実施され、現在両トンネルは許容範囲の寸法で接合している。しかしながらボーリングによる探査は既設トンネルの位置がまったく予想外の位置にある場合、探査の効率が極めて悪くなると考えられる。そこで掘削トンネル近傍のある程度広い範囲を対象として、既設トンネルを効率よく探査できる技術が望まれる。本研究は、元来切羽前方地質探査を目的として開発された弾性波測定技術を応用し、既設トンネルの位置推定を試みたものである。

2. トンネル工事の概要

掘削したトンネルは図1のように斜坑、本坑とこれより分岐する水平坑から構成される。既設トンネルは当初点線の位置にあると推定されていた。実際は実線で示す位置にあって両者に大きな差はなかった。既設トンネルは掘削トンネルの本坑、水平坑の2カ所において接合する。地山は中世代～新生代起源の布引花崗閃緑岩からなり、その大部分は堅硬、新鮮であるが、沢部など土かぶりの少ない場所では風化が進展し、亀裂が発達している。

3. 機器の構成

既設トンネル探査に用いたのはスイスアンベルグ社が開発した切羽前方予知システム（TSP）である。図2に機器構成を示す。TSPはトンネル掘進にともなって遭遇すると予想される地質不連続面の探査のために開発された。探査原理はVSP^{(1) (2)}と同様であるが、掘削中の山岳トンネルに適用するため設置に手間のかかる受振器を1カ所固定として測点数を減らしている。図3は受振器の外観で、シャフトに圧電素子を用いた2方向加速度計ユニットを3組装着しており、ケーシングと受振センサーは密着する。信号はS/N比向上を期待して3組分を混合し記録装置に送る。記録装置は着脱式の制御コンピュータを含んだバッテリー組み込みの一体型である。本システムは簡易解析のソフトを用意して、計測実施の後すみやかに結果を呈示できるようにしている。この簡易解析のフローチャートを図4に示す。

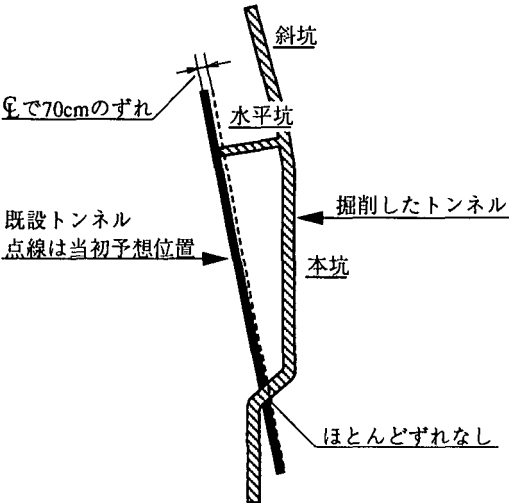


図1 トンネルの概略

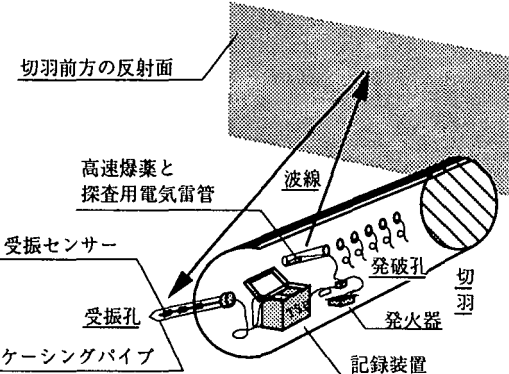


図2 探査機器の構成

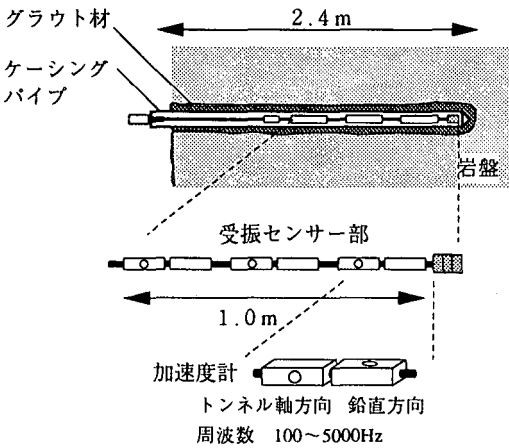


図3 受振器の外観

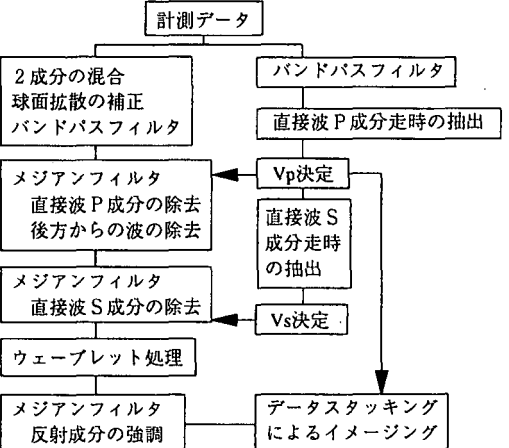


図4 簡易解析の手順

4. 測線の配置

既設トンネルの主要な寸法と測線の展開は図5のとおりである。探査前の情報によると水平坑と既設坑道との接合部では両トンネルがほぼ直交すると考えられた。発破で起震された波の入射方向から見た既設トンネルは、高さ・奥行きとも2～3mと小さいが、幅は探査範囲を縦断する線状の構造とみなせる。また予想される既設トンネルは切羽前方の10～30mにあると考えられた。そこで V_p を遅めに見積もり、1000m/sであっても探査範囲に既設トンネルが十分に含まれるようにした。すなわち測線はトンネル軸方向に45.5m、記録する走時は0.16sまで（サンプリングレート40 μ s）として、受振点前方80mまでを範囲とした。

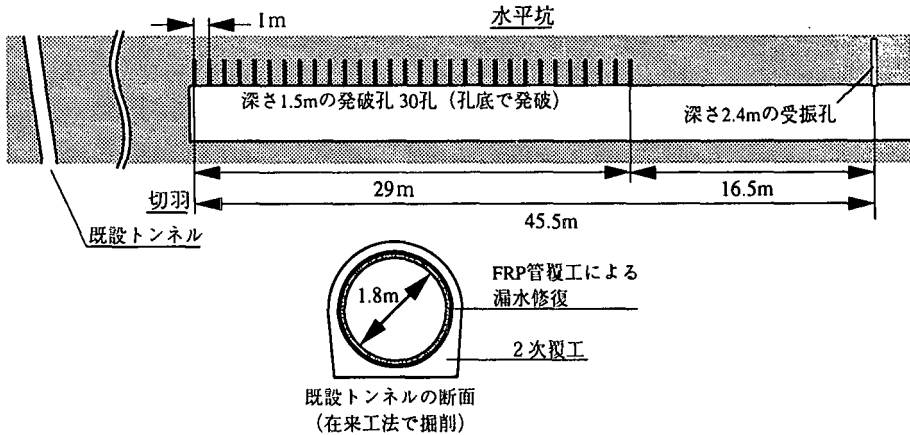


図5 測線の展開

5. 周波数特性の改善

既設トンネルは比較的小さな構造である。探査の分解能を向上させるには、起震波の周波数特性に高周波数成分が多いことが望ましい。爆薬で起震する場合、爆速を高めると高周波数成分が多くなり、薬量増加は逆の効果を持つことが経験上知られている。そこで爆速を6000m/s程度まで高めたTNT:ペンスリット=50:50の爆薬、ペントライトを30g使用した。またトンネル近傍のゆるみ領域を通るような波線の場合、高周波数成分がそこで失われることが予想される。ゆえに起震点、受振点ともに新鮮な部位の岩盤に設置されることが望ましい。堅硬・均質な岩盤を発破掘削した場合のゆるみが1m程度との報告⁽³⁾を参考にして、起震点と受振点は坑壁より1.5m深さになるよう配置した。受振点より最も離れた起震点から入射した波形の周波数特性を図6に示す。これによると1kHz程度の高い周波数まで十分記録されている。記録した周波数をこの半分の500Hzとして、 $V_p=1000$ m/sのときの波長2mがおおよそ既設トンネルの断面寸法に等しいことから、この周波数特性で必要な分解能は得られると考えられる。

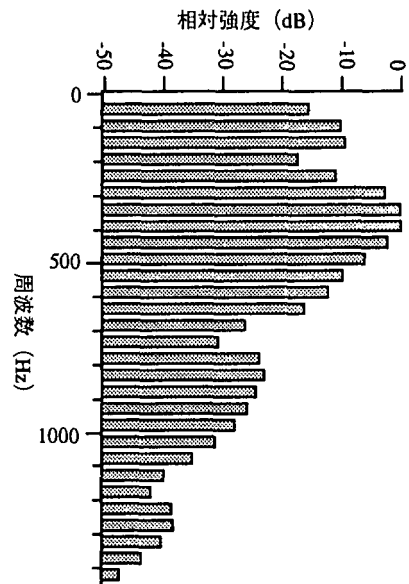


図6 起震点から最も離れた受振点でのスペクトル

6. 採取波形の状況

図7は測定された波のトレースをオフセット距離で並べた図である。計測では2方向の波の成分を得ているが、これはトンネル軸方向の成分である。以降の解析には既設トンネルの位置から見て、この方向の成分のみ用いることにした。図7では直接波のP波を明瞭に読みとることができる。その走時は直線上に並ぶことから測線内には計測に影響を及ぼすような低速度帯などの不連続面はなかったと考えられる。またオフセット距離で20m過ぎから屈折波と思われる成分が表れている。TSPでは片道走時のみ計測するので屈折法の適用はできないが、トンネル坑道におおむね並行した高速度層があると推測される。図8は図4の手順に沿って、図7に示した波形を処理したデータスタッキング直前のトレースである。30~40ms付近に複数の反射波と思われる成分が現れている。この段階で反射波がはっきりと抽出できればデータのスタッキングをしなくても、トレースから反射面の深度を算定することが可能である。しかしトレースのみから反射面を抽出することは、経験に頼る部分が多くて困難と考えられる。

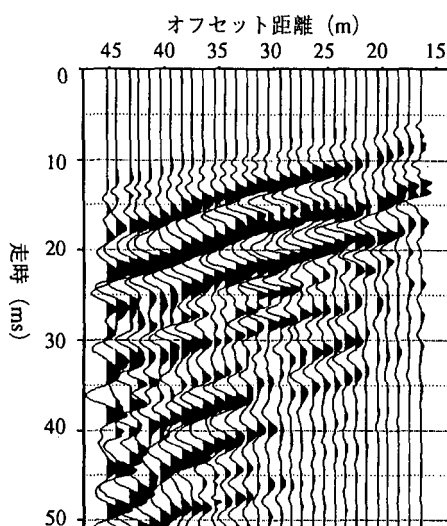


図7 測定記録

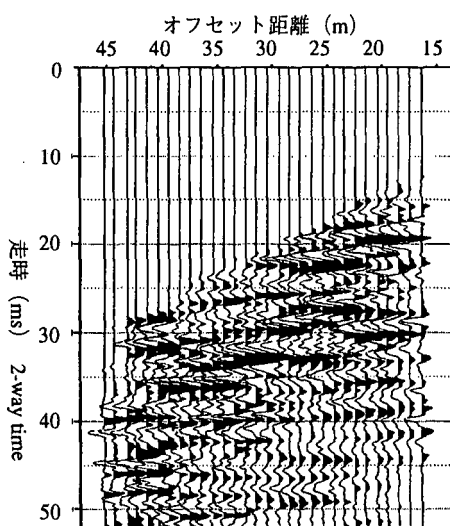


図8 反射波を強調したもの

7. データスタックの方法

データのスタッキングおよび反射点の深度変換を行うには速度構造の決定が必要である。TSPシステムの簡易解析では、直接波のP波走時の勾配より求めた弾性波速度を全領域にあてはめる。岩盤不連続面の探査を目的としながら速度構造は均質とする点に矛盾があるが、解析手順が非常に簡単のため現地にすぐ解析図面を得ることができる。また簡易解析はスタックによるイメージング処理方法として、イメージポイント法およびディフラクションスタック法⁽⁴⁾（以降IPおよびDSと略す）を用いる。IP、DSとも格子点を任意に設定し、それを反射点とする波線の経路を求めて所要の走時を計算する。この走時に対応する記録上の各トレースの振幅を各格子点に足し合わせるのも同じである。異なるのはIPが抽出された反射点と起震点との垂直2等分線を反射面と考えるのに対し、DSは反射面を抽出された反射点の並びで表現する点である。

図9は図8の波形に対しDS解析を行った結果である。円の大きさはスタックされた振幅のエネルギーを相対強度で表示している。この図より反射点と思われる場所が、切羽前方ではなくやや斜め前方であることがわかる。既設トンネルの構造からみて反射面は図9上でおおむね直線となると予想される。そこでこれら反射点の並びに直線をあてはめて外挿し、トンネルとの交点を求める。この点が切羽前方に予測された既設トンネルや岩盤の不連続面の出現位置と考えられる。図10に探査結果と実際の掘削結果との対応を図示す

る。ここで探査結果の境界線に付けた番号は、図9でひいた直線の番号と対応している。既設トンネルの境界と思われる一対の反射面が抽出された。しかしその幅は既設トンネルの外径よりもやや広い。掘削時に既設トンネル周囲に空洞が観察されたことから、その影響ではないかと推測される。

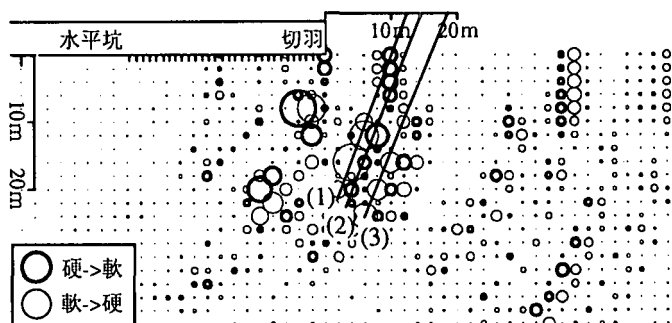


図9 ディフラクションスタックの状況

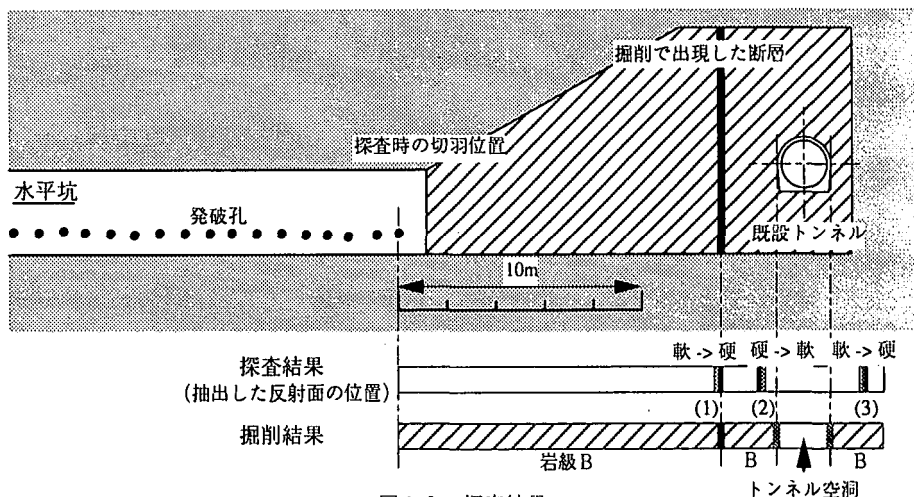


図10 探査結果

8. おわりに

岩盤中の比較的小規模な人工構造物を反射法により探査した結果、構造物による反射面が認められた。処理に用いた簡易解析法では速度構造を均質と仮定している。したがって複雑な構造に適用すると誤差が大きくなると予想されるので、まずこの簡易解析法の適用限界を明らかにしなければならない。今後トンネル現場で予想される急速化施工に対応した技術として、TSPを含め各種物理探査法に期待している。しかし、せっかく精度が高くても計算処理に時間を要すると、施工管理手法としては敬遠されてしまう。現状の技術のままではまだ問題が多く、より一層の計算処理等の簡易化が重要と考えている。

参考文献

- (1) G. Sattel, P. Frey and R. Amberg. 1992. Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods - pilot project in Centovalli Tunnel, Locarno, Switzerland. First break vol.10, No.1.
- (2) A. H. Balch, M. W. Lee, J. J. Miller and Robert T Ryder. 1982. The use of vertical seismic profiles in seismic investigations of the earth. Geophysics vol.47, 906-918.
- (3) 田中義春, 平田篤夫, 山本雅昭, 松永博文. 1994. 雷管の斉発性の向上による損傷領域の低減に関する実験的研究. 第9回岩の力学国内シンポジウム講演論文集. 563-568.
- (4) 斎藤秀樹, 吉田真一, 浦山克, 山田雅行. 1993. 横坑間地震探査による反射波イメージングの試み. 物理探査学会第89回学術講演会論文集. 169-173.