

トンネル切羽前方探査における高精度化の検討

A STUDY ON THE IMPROVEMENT OF PREDICTION AHEAD OF TUNNEL FACE

塚本耕治・浜田 元・篠原 茂・寺田道直

Koji TSUKAMOTO, Hajime HAMADA, Shigeru SHINOHARA and Michinao TERADA

TSP method which is one of the elastic waves reflection method has been applied in many tunneling fields. However, it is known that the prediction accuracy depends on the structure of the geology. Authors developed the analysis code which simulated wave propagation phenomenon of elastic wave using simple input parameter. In addition, evaluation program which estimated the reflecting surface ahead of face was developed. We examined the survey method in order to improve the accuracy of the reflection survey method.

Key Words: Prediction ahead of tunnel, TSP method

1. はじめに

近年、反射法地震探査の1つであるTSP (Tunnel Seismic Prediction) 法をトンネル現場に適用する事例が増えているが、地質構造が複雑で軟質な岩が多い日本の地山にTSP法を適用する機会が多くなるにつれて、TSP法の問題点や課題が明らかになりつつある¹⁾²⁾。著者らは探査結果の解釈を容易にして探査の予測精度を向上するため、発破により発生する弾性波の波動伝播現象を簡単な入力パラメータを用いてシミュレートする解析コードを作成した。さらに、その地震波を波形処理し切羽前方の反射面の位置を予測する評価プログラムを開発した。この評価プログラムは実測の地震波も解析できるようにした。

ここでは、反射法地震探査の探査方法と評価方法を工夫し探査精度を向上させることを目的に、以下の2つの項目について数値シミュレーションを行い、適用性を調べた。

① 複数の受振計を用いた3次元モデルによる反射エネルギー評価

② 受振計を切羽近くに設置した探査法

さらに、②については現場実験を行い、実測データを用いて検討した。

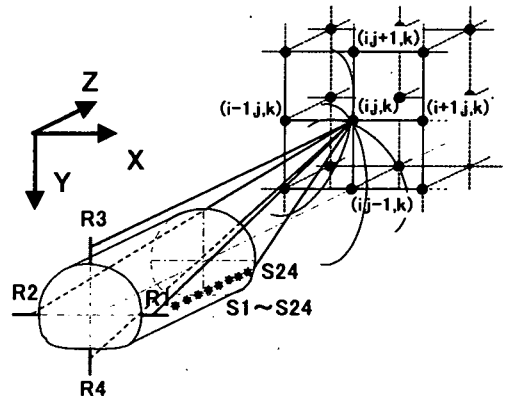


図-1 3次元モデルによる反射エネルギー評価

図-2は右側壁の受振点Rのみを設置した解析モデルを、図-3は右側壁の受振点R1に加えて左側壁にR2、上下方向にR3およびR4の受振点を設け、4つの受振計で地震波を計測する解析モデルを示す。解析領域は45m(x)×45m(y)×150m(z)の範囲とし、水平方向をx軸、鉛直方向をy軸、トンネル軸方向をz軸、格子点間隔は1.5mとした。発振点および受振点はx=28.5m、y=22.5mの側線上のx=10.0m地点を受振点Rとし、受振点に近い発振点からS1、S2……S24とした。反射面は受振点から100mのトンネル軸上で水平角110°、傾斜角60°で交差するものと仮定し、反射面から坑口側の地山部分における格子点の V_p を4km/s、トンネル進行側の地山部分における格子点の V_p を3km/sにした。時間刻みは 4×10^{-5} 秒、計算ステップ数は2000として計算を行った。

2.3 解析結果

図-4は図-2の解析モデルに対する水平断面(A-A断面)、鉛直断面(B-B断面)の反射エネルギーのコンター図を示す。3次元モデルの反射波に対応する反射エネルギーは発振点と受振点を焦点とする1つの楕円曲面状に卓越する。しかし、トンネル軸に対して反対側にも本来の反射面とは異なる偽像が現れ、反射面を確定できない。これは、発振点と受振点が1つの直線上にある場合は、その測線を軸として楕円曲面群が対称に分布するからである。

図-5は図-3に示す4つの受振計の解析モデルに対して算出した反射エネルギー分布を示す。反射エネルギーは、4つの受振計で計測された反射波の振幅をたし合わせた値を用いて求めた。図-4の結果と比較すると、偽像は薄れて真の反射面が強調されている。図中の実線は解析から反射面と思われる部分に線を引いたものでトンネル軸との交点を受振点から100mの位置にあり、受振計をトンネル断面内に3次元的に配置することで精度よく評価できることがわかる。

3. 切羽近くに受振計を設置した探査方法

3.1 計測波形の解析評価法

従来のTSP法は受振点から反射面までの距離を予測するため、探査区間のうち受振点位置から切羽までの区間(約50m間)は、既に掘削済みで無駄になる。また、受振点の位置は切羽から離れているため、計測された波形はトンネル空洞の影響を受けていると考えられる。このため、探査後の波形処理方法を工夫することで、切羽近くに受振点を設置した探査が適用できないかを調べた。24個の発振点の後方に受振計を設置して計測する探査を探査法1、発振点の前方の切羽近くに受振計を設置して計測する探査を探査法2として、両者の波形処理手順の比較を図-6に示す。大きな違いは、探査法2が直接波を除去せずに反射波の振幅を距離減衰の補正で増幅したことであり、探査法1は処理波形に t_{d1} を加えて反射波Aを整列するのにに対し、探査法2は t_{d1} を引いて反射波列を整列させることである。

3.2 数値シミュレーションの概要

数値シミュレーション³⁴⁾は探査法1と探査法2について波動伝播の解析を行い、受振点位置で得られる反射波を用いて算出される反射エネルギー分布を比較することで、探査法2の適用性を調べた。

解析モデルは、図-7に示すように解析領域を200m(x)×400m(z)、トンネル軸直角方向をx軸、トンネル軸方向をz軸、格子点間隔は0.5mとした。受振点Rの位置は、x=100mの測線上に解析モデル1の場合にはz=170m、解

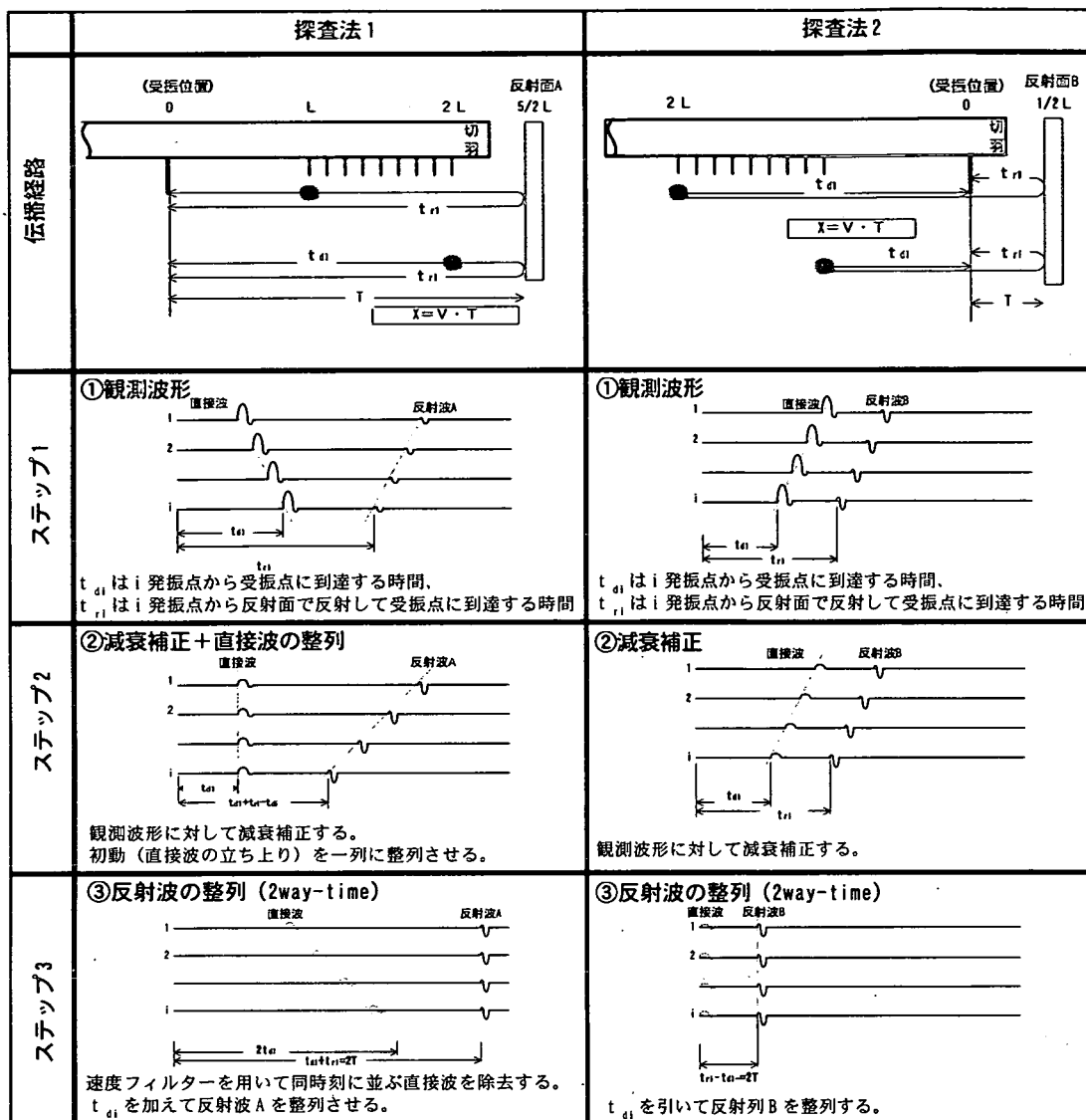


図-6 波形処理手順の比較(両者で違う処理部分)

析モデル2の場合には $z=100\text{m}$ に置き、発振点は受振点から最も近い距離が 16.5m になるように、 1.5m 間隔で24点配置した。地層モデルは調査測線上の $z=245\text{m}$ の位置で、厚さ約 25m の弱層部($V_p=3\text{km/s}$)が測線に対して 60° で交差するとした。そのため、調査法1は受振点から 145m 地点(反射面B)で弱層部に交差するように V_p を 4km/s から 3km/s に、 170m 地点(反射面C)で V_p が 3km/s から 4km/s に変化するようにした。調査法2の受振点は調査法1に比べてトンネル進行方向に 70m ずれた位置にした。また、坑口方向からの反射波をノイズとして波形処理で除去できるかを確認するため、坑口側の地山の V_p を 3km/s として $z=25\text{m}$ の位置で角度 104° で交差する反射面Aを設定した。反射面は弱層地山における格子点の V_p を 3km/s 、それ以外の地山における格子点の V_p を 4km/s とすることで与えた。時間刻みは 8×10^{-5} 秒、2000ステップの計算を行った。

3.3 解析結果

図-8 (a)は図-7 (a)の解析モデルに探査法1の波形処理を、図-8 (b)は図-7 (b)の解析モデルに探査法2の波形処理を適用して得られた反射波を2次元平面に反射エネルギー分布としてイメージング処理したものである。図中の○は格子点を中心として、反射振幅エネルギーの大きさを半径とした円である。探査法1の結果は受振点から145m地点で硬～軟の反射面Bと175m地点で軟～硬の反射面Cを評価し、探査法2は75m地点で硬～軟の反射面Bと105m地点で軟～硬の反射面Cを評価している。また、反射面Aの反射列は、いずれの波形処理でも除去されている。このことは、受振計を切羽近くに設置した場合でも従来のTSP法と同程度の精度で探査結果が得られることを示している。なお、反射面Cの評価位置が解析モデルと一致しないのは、反射面B～C間の弱層部を初動の $V_p=4\text{km/s}$ を用いて反射面の位置を算出したためである。

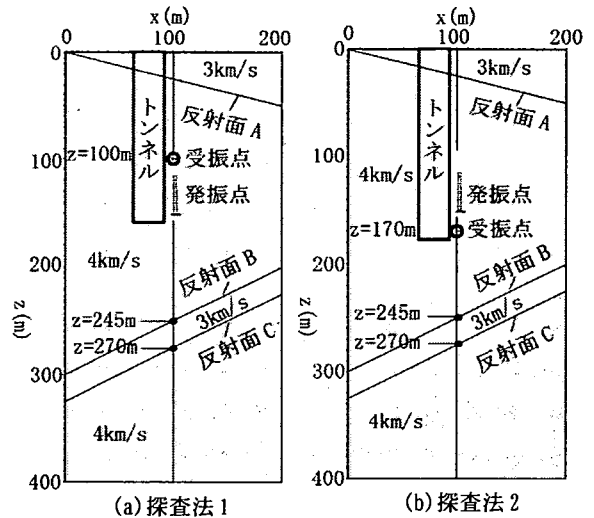
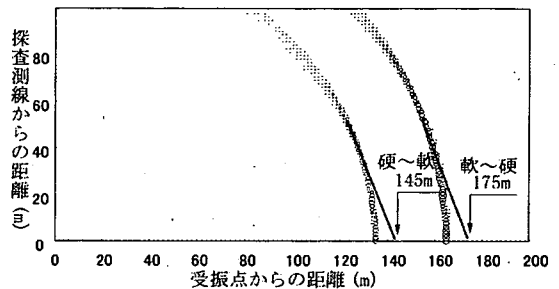
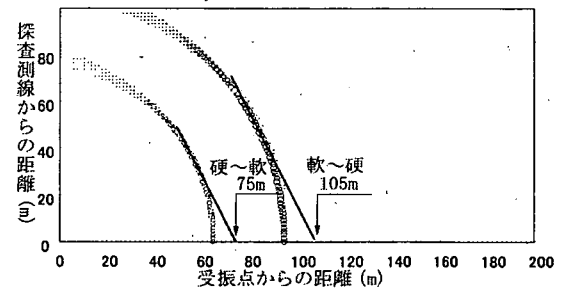


図-7 解析モデル



(a) 探査法1



(b) 探査法2

図-8 反射エネルギー分布

4. 現場実験

4.1 測定概要

現場実験はAトンネルのⅡ期線工事において、切羽前方地山の弱層変化位置を前もって知るために実施した。実験に際しては、24個の発振点と坑口側と切羽側のそれぞれに受振計を設置して行った。

4.2 測定結果と実際の地質状況の比較

図-9は、実際の地質状況と探査法1、探査法2の波形処理した反射エネルギー分布の結果を比較したもので、図中には反射エネルギーの大きい部分のみを選択して反射面を抽出した。地山の状態はSTA320+75付近で黒色片岩から軟弱な蛇紋岩に変化した。探査法1は受振点から60m地点に硬～軟に変化する反射面を、探査法2は受振点から12m地点に硬～軟の反射面を予測しており、両探査法とも実際の地層境界面の位置とほぼ一致する。反射エネルギー分布は、探査法2の方が受振点が地層境界面に近く、周辺に比べて○が大きくコントラストがやや強い。また、探査法2は受振点から30m地点にも硬～軟に変化する反射面を予測している。この付近の地質には堅硬な蛇紋岩の塊状になって存在していたが、これらとの対応は明らかでない。

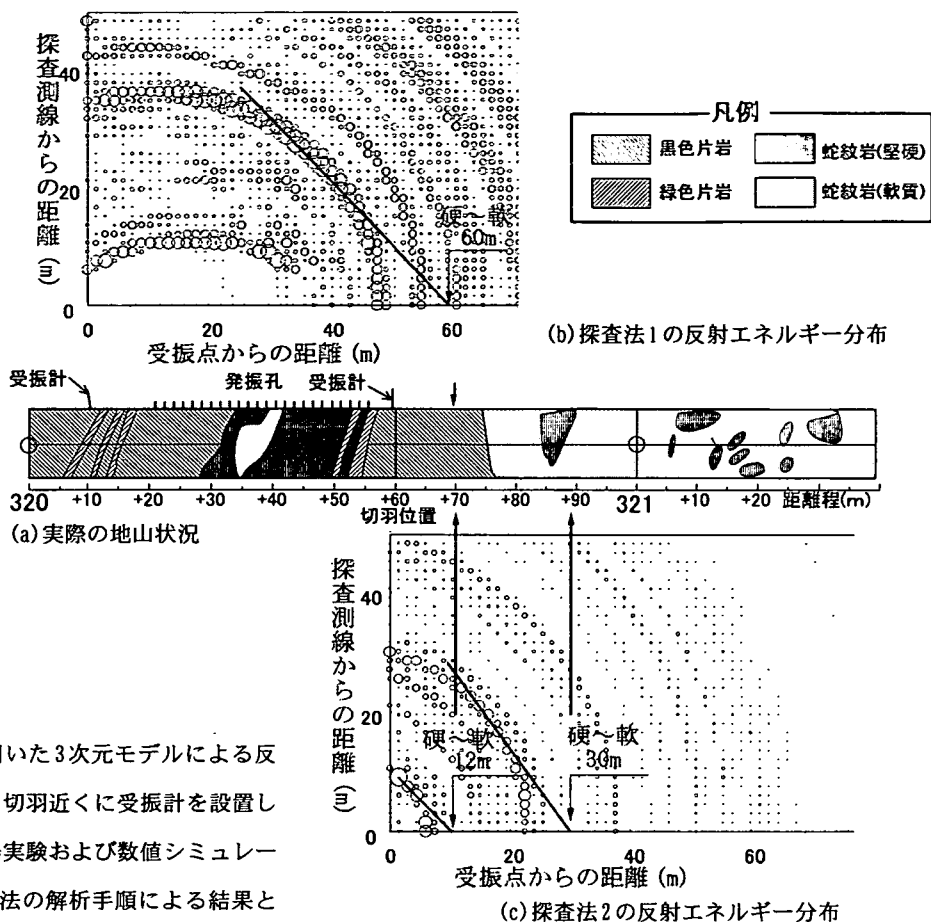


図-9 探査による予測と実際の地山状況の比較

5. おわりに

複数の受振計を用いた3次元モデルによる反射エネルギー評価と切羽近くに受振計を設置した探査について現場実験および数値シミュレーションを行い、TSP法の解析手順による結果と比較することで、その適用性を検討した。その結果、以下のような知見が得られた。

- (1) 複数の受振計で計測された観測波形を用いて3次元モデルで反射エネルギー評価することで真の反射面が明瞭に現れて予測精度が向上すること、まだ、検証はしていないが、受振計の数を増やして配置を工夫することで、さらに予測精度が向上することが予想される。
- (2) 受振計を切羽近くに設置し、波形解析の処理方法を工夫することで、より前方の反射面の位置を予測できる可能性がある。

さらに2つ項目を組み合わせて切羽近くに複数の受振計を設置し、3次元モデルによる反射エネルギー評価をすることにより、探査精度をさらに向上できると考えられる。今後、数値シミュレーションを活用して検証するとともに現場への適用実績を増やして実用化を図りたい。

【参考文献】

- 1) 大沼和宏, 笠 博義ほか: TSP法による断層探査適用上の留意点, 土木学会第50回年次学術講演会概要集, VI部門, pp. 208-209, 1995. 9
- 2) 西野治彦ほか: 様々な地質条件下におけるTSP切羽前方探査の適用性, トンネル工学研究発表会論文報告集第5巻, pp. 347 ~ 352, 1995. 11
- 3) 塚本耕治, 寺田道直ほか: TSPによるトンネル切羽前方探査 (第2報), 奥村組技術研究年報, No. 25, pp. 31-36, 1999
- 4) 常旭, 芦田譲, 佐々宏一: 差分法による弾性波探査における波動現象のシミュレーション, 水曜会誌, 21巻, 3号, pp. 201-210, 1990