

Ⅲ－B 90

T S P 探査の数値シミュレーション

棚奥村組

正会員

塚本耕治、寺田道直

//

//

篠原 茂、浅野 剛

1. はじめに

トンネル切羽前方の地質状況の予測のために弾性波反射法の1つであるTSP法を幾つかのトンネル現場に適用してきた。予測結果と実際の地山状況を比較した結果、音響インピーダンス比が大きく変化する場合には地層境界面の位置を比較的精度よく予測できる反面、音響インピーダンス比があまり変化しない場合でも反射面として評価するなど、予測精度は前方の地質構造に影響される。このような場合に備え、想定される地山構造に対して数値シミュレーションにより反射波の記録や反射エネルギー分布を求めておけば、探査結果の解釈に役立てることができる。ここでは、比較的精度よく探査できた事例を対象にTSP探査の数値シミュレーションを行い、その適用性を検討した。

2. 対象事例

図-1は探査結果と実際の地質状況の関係を示す。地山状況はTD2160m付近から所々に固結度の低い粘土層を挟むようになり、TD2168m付近の右下半部からはさらに軟質化し、切羽面が崩壊する程度に拡大している。TSPの探査結果はこのような実際の地山状況とよく対応している。

3. 数値シミュレーション

3.1 解析手順

数値シミュレーションは、探査結果に基づき地層構造を仮定した解析モデルに対して、各発振孔位置で起振して受振孔位置に到達する地震波を計算し、探査と同様の解析処理により反射波、反射エネルギー分布および地層境界面の位置を抽出する手順で行う。地震波の計算には波線理論による方法や有限要素法、差分法などが用いられるが、ここではプログラム化が容易な差分法を用いた。計算プログラムは複雑な地層構造にも対応できるように、地層境界面を受振孔からの距離、トンネル軸に対する交角、地層のP波速度など単純なパラメーターを入力としている。

P波の2次元スカラー波動方程式は

$$\frac{1}{V_p} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{\partial^2 P}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial Y^2} \quad (1)$$

となる。計算は(1)を差分近似により離散化したものに次式の振源を初期条件として発破位置に与えて行う。

$$P(X, Y, 0) = \exp\{-A^2((X-X_0)^2 + (Y-Y_0)^2)\} \quad (2)$$

ここに、 V_p ：P波速度、 A ：振源パラメータ、 X_0, Y_0 ：振源座標

地層境界面が明瞭に現れたTD2168m～TD2190m付近の地山を対象にした解析モデルを図-2に示す。解析領域はトンネル軸方向Xに180m、トンネル軸直角方向Yに45mとした。

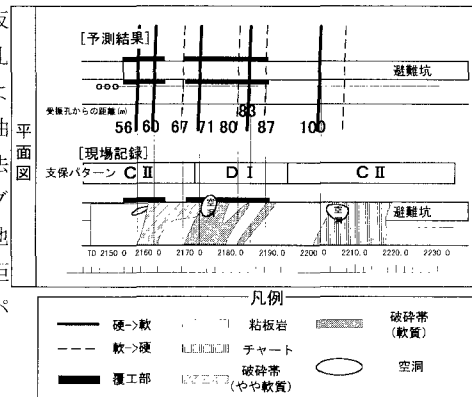


図-1 反射面の予測と実績

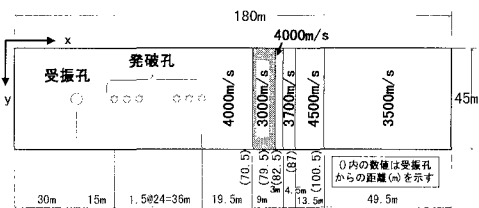


図-2 解析モデル

キーワード：TSP探査、数値シミュレーション

連絡先：茨城県つくば市大砂387 TEL 0298-65-1781 FAX 0298 65-0782

$x=0 \sim 100.5\text{m}$ の V_p は発振孔～受振孔の走時曲線から得られ P た 4000m/s とし、地山状態が悪くなる $x=100.5 \sim 109.5\text{m}$ については探査区間に現れた破碎帯の V_p と同じ 3000m/s にした。それより前方の地山については探査結果の地層境界面の位置が再現できるように掘削時の切羽観察を参考に V_p を P 変化した数ケースの数値シミュレーションの結果から決めた。計算の格子点は x 方向、 y 方向とも 1.5m 間隔、時刻 m および計算ステップ数は 4×10^{-5} 秒、 2000 とした。

3.2 解析結果

任意の時刻における波動の伝播状況を図-3に示す。モデルの周辺境界に透過境界条件を与えているため、周辺境界からの明瞭な反射波は見られない。

図-4は各発振孔に対する受振孔位置での計算波形を並べたものである。直接波の後に地層境界からの反射波が続くが、直接波の振幅に比べ振幅が小さいために分かり難い。

図-5は図-4の計算波形を減衰補正、フィルター処理で得られた反射波形であり、いくつかの反射列が確認できる。

反射エネルギーの空間分布を図-6に示す。この反射エネルギー分布から予測される地層境界面は、受振孔から 69m , 80m , 86m , 90m , 100m の位置にある。図-2の解析モデルと対応させると、受振孔から 69m , 80m および 100m にある地層境界面の位置は解析モデルと対応しているが、 86m , 90m の位置はあまり対応していない。これは、この地層境界の音響インピーダンス比が相対的に小さいことや用いた振源の波長が 30m 程度と大きく、層厚の薄い地層の反射波を精度よく抽出できなかったことが考えられる。

反射エネルギー分布から地山状態を評価する可能性について調べるため、図-2の解析モデルを $V_p=4000\text{m/s}$ の地盤 ($x=0 \sim 100.5\text{m}$, $109.5 \sim 180\text{m}$) に $V_p=3000\text{m/s}$ の地盤 ($x=100.5 \sim 109.5\text{m}$) が介在する比較的簡単な3層構造モデルにして数値シミュレーションを試みた。反射エネルギー分布を図-7に示す。受振孔から 69m と 80m 付近の反射エネルギーの大きさを示す○の大きさは同程度であり、地層境界の反射係数と対応している。

4. まとめ

探査結果の評価を支援する上で、TSP 探査の数値シミュレーションは有益である。より現実的な問題にも対応できる3次元プログラムを開発済であるが、予測される地質状況の定量的な評価には減衰補正が重要になると考えている。

参考文献

- 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
溜渕孝治, 塚本耕治, 寺田道直ほか: 既設避難坑からのTSP探査と数値シミュレーション, 第33回地盤工学研究発表会, 1998

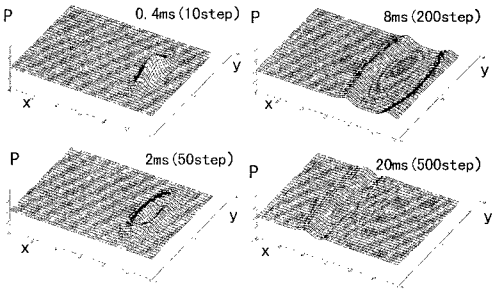


図-3 波動の伝播状況

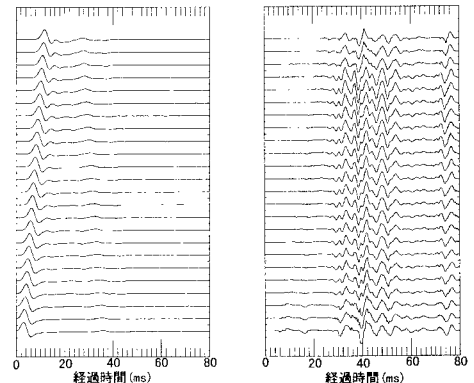


図-4 計算波形 (処理前) 図-5 反射波形 (2way-time)

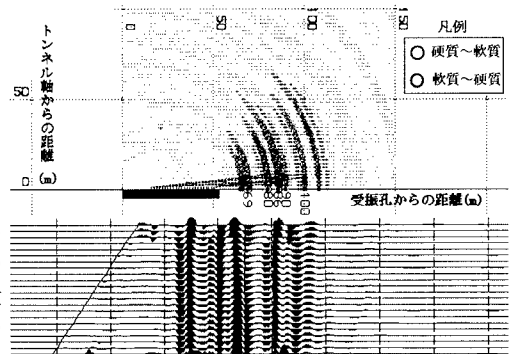


図-6 反射エネルギー分布

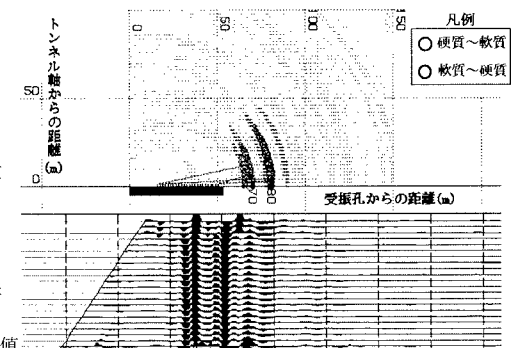


図-7 反射エネルギー分布 (3層モデル)