

III-B 400 TSP切羽前方探査法のための反射波伝播シミュレーション

西松建設技術研究所 正会員 平野 享
同 上 正会員 稲葉 力
京都大学工学部 芦田 譲

1、まえがき

山岳トンネルにおける切羽前方探査法の一つとして、TSP⁽¹⁾が施工現場に導入されて数年が経つ。TSPの技術はハードとソフトの両面が対になってはじめて発揮できるものであり、本質的に地形や地質状況を加味して探査結果を解釈しなければならない。探査範囲に地表面や風化した表層を含む事例では、地表面や表層を本来の探査ターゲットである地下の断層や破碎帯と区別する必要があると考えられる。片おしのトンネルで出口側に接近した地点、谷部で被りの浅い地点での探査などがその状況に該当すると思われる。本研究は、地質縦断面図にある弾性波速度の構造を入力として、任意のTSP探査を行った場合に予想される反射波記録をシミュレーションで得ておき、探査計画あるいは実際の結果の解釈に役立てようとするものである。

2、適用事例の概要

図1は被りの浅い谷部の直下を通過するトンネルの例である。地質は天竜峡花崗岩で、事前調査から図中に記載した弾性波速度が予想された。TSP探査を実施する時点の切羽前方50mで、被りがおよそ30mを底とする谷部の地形を持っている。谷部の底を中心に表層では崖錐堆積物が観察され、トンネル計画線上でも弱面の存在する可能性があったので、TSP探査の適用となった。TSPで探査できる範囲は岩盤の種類や弾性波速度に大きく影響されるが、一般に地震計の位置から150m程度である。ゆえに谷部はもとより、地表面を含めて探査範囲となることがわかる。

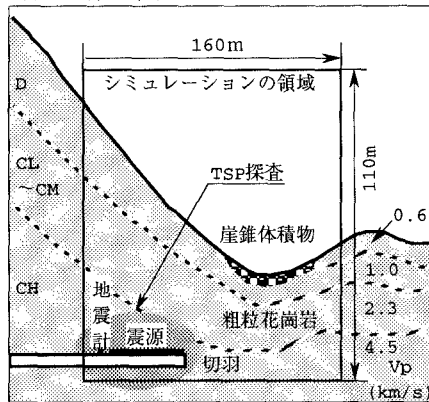


図1 谷部直下のトンネル例とTSP探査

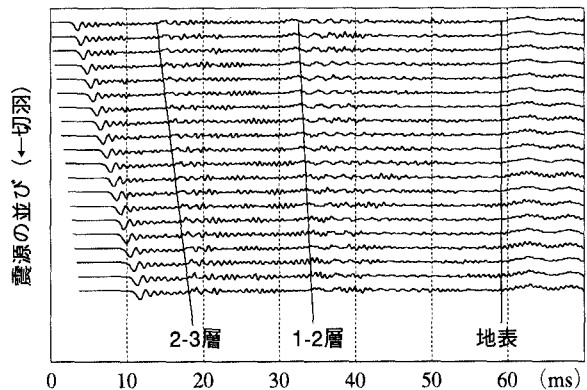


図2 シミュレーションによる波形 (2way-time表示)

3、シミュレーション条件

シミュレーションの設計では、入力となる弾性波速度が縦断面上の2次元配置であること、また岩盤の v_p 以外の情報が不明であることから、粘性を無視したP波だけの2次元伝播現象をシミュレートした。このとき波動現象は1式のスカラー波動方程式で表される⁽²⁾。この波動方程式を差分近似により解いた。初期条件は震源、すなわちTSP探査における発破点に2式のような波形を与えた。境界条件は地表面にディリクレ境界を与え、それ以外の計算領域が有限のために生じる境界には透過境界条件を与えた⁽²⁾。差分計算する領域はTSPの探査範囲にあわせて地震計の位置から掘削方向 x に150m、深度方向 z は地表面からトンネル計画線までとした。ただし境界上に震源や地震計が配置できないので、その部分は幅10mほど余分な領域がある。また差分のために離散化した計算点の間隔は x 、 z とも1m間隔である。以上の条件はシミュレ

トするTSP探査のサンプリング間隔（数十～数百 μ s）において差分計算の安定条件を満たしている。

$$\partial^2 p / \partial x^2 + \partial^2 p / \partial z^2 = (1/c^2) \partial^2 p / \partial t^2, \quad c: v_p \quad (1)$$

$$p(x, z, 0) = \exp\{-a[(x-x_0)^2 + (z-z_0)^2]\}, \quad \partial p / \partial t = 0 \quad (2)$$

4、シミュレーションの結果

図2はシミュレーションの結果得られた予想探査記録である。TSP法の解析手順にしたがって、オリジナルの波形に対し2way-time変換および球面拡散による減衰分の振幅補正を施してある。また図3は地盤内を弾性波が伝播している様子を示した透視縦断面図である。図2と同様の図面を時系列的に描いていくと、弾性波が速度境界と地表で反射し、震源から遠くで反射するものほど周期の長い波となって地震計に至ることがわかる。これらを参考にして図2のトレース中に反射波の部分を探すと、3つ見つけることができ、走時の早いほうから2-3層境界、1-2層境界、地表に対応している。図3は実際にTSP探査を適用した結果で、シミュレーションの図2に相当するものである。シミュレーションで明瞭に現れた2-3層境界、1-2層境界に対応する部分にやや乱れはあるが反射波列が捕らえられている。またトレース上のこの二つの境界間にある部分では、観測される波形の振幅が他と比較して大きく密に存在しているが、シミュレーション結果でもその兆候が捕らえられている。図3の透視縦断面図を見ると、第2層では多重反射と上層からの再入射が複雑に干渉して反射波をしばらく発射し続ける様子が示されている。すなわち反射波の振幅が密に存在する部分が、速度構造にこのような中間層があると現れることがわかる。トレース上で反射波の振幅が一群となって存在したとき、必ずしも反射面が複数存在することを示すとは限らないと考えられる。

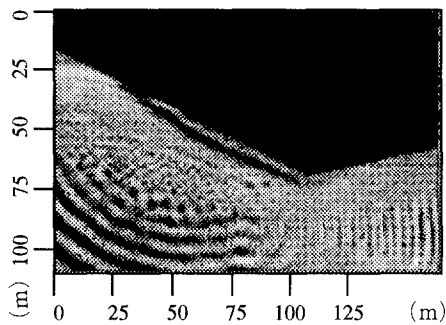


図3 シミュレーション波動伝播 (t=36ms)

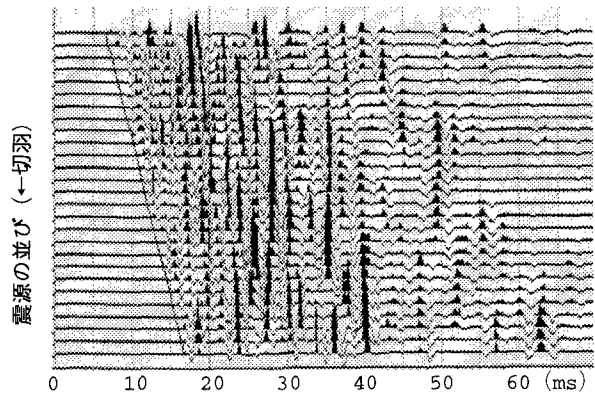


図4 TSP探査により観測された波形 (2way-time表示)

5、おわりに

TSP法による切羽前方探査を支援するために、反射波伝播シミュレーションを行うことは有用である。それは今回示したような観測結果の理解の助けとなるだけでなく、測線配置などの探査計画にも適用できると期待している。とくに今回用いた2次元スカラー波動方程式であれば、典型的なTSP探査をシミュレートすることは非常に簡単に行える。今回の計算例ではPowerPC601 (100MHz) のコンピュータで必要な計算時間はおおよそ半日であった。

参考文献

- 1) G. Sattel, P. Frey and R. Amberg : Prediction ahead of the tunnel face by seismic methods - pilot project in Centvalli Tunnel, Locarno, Switzerland, FIRST BREAK, vol.10, No.1, PP.19~25, 1992.
- 2) 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, 第21巻, 第3号, PP.201~210, 1990.