トンネル軸方向を考慮した逆解析手法による切羽前方の地質予測

中央大学	学生員	○樋川	敦
中央大学	正会員	川原	睦人
佐藤工業(株)	正会員	金子	典由

1. はじめに

トンネル掘削において事前に切羽前方の地山状況、例えば軟弱地山帯、断層破砕帯の存在などを把握し、その対 策を講じることは重要である。従来のトンネル切羽前方の地質探査方法として、先進ボーリングにより地盤を採取 する方法、TSPや弾性波による方法などが存在するが、いずれの方法も物理探査計測機器を使用し、一時的に掘削 を中断しての作業となるため工程が遅延する原因となった。また、多くの段取りと手間とを必要とするため、日常 的な施工管理の一環として行えないという問題があった。そこで、本研究ではデジタル的に評価できる数値解析に よって切羽前方の地質を予測する手法を提案する。その効果的な方法として、掘削進行状況を反映した3次元解析 モデルを用いた内空変位計測データを与条件として逆解析を行うことにより掘削部前方の地盤定数を同定する方法 がある。本稿では、この手法の実用性を確認するために理想モデルによる解析結果について検討した。

2. 本研究における逆解析手法

本研究では、ヤング係数を同定される地盤定数とした。ヤング係数の同定解析では、解析領域と境界条件、ポア ソン比、荷重を与え、さらに有限個の変位データをもとにヤング係数を計算する。同定計算法は多く存在するがこ こでは最小化問題として取り扱う。そのため、下式(1)に示す評価関数を定める。

$$J = \frac{1}{2} \left\{ (u - u^*)^T (u - u^*) \right\}$$
(1)

ここで、uは計算された変位、 u^* は観測データ変位を表す。評価関数Jは計算された変位と観測データの差の二乗 和で表す。ヤング係数が正しく決定されれば評価関数Jはゼロに近づく。すなわち、評価関数Jを最小にするヤン グ係数が見つけられれば同定計算が完了する。この最小化問題を解く方法として、今回は共役勾配法の一種である Fletcher-Reeves 法を採用した。

3. 解析モデル

地山は三次元線形弾性体モデルを用いた。図1に示されるように、トンネルの掘削進行状況を考慮した三次元有限要素解析モデルにおいて、トンネル軸方向に沿って層状にブロック割りするとともに、各ブロック領域は同領域内においてヤング係数が一定であるとする。今回は健全な地山のヤング係数を $E = 2000kN/m^2$ とし、軟弱な地山のヤング係数を $E/4 = 500kN/m^2$ とした。つまり、ヤング係数Eの値を取る地山とE/4の値を取る地山との境界位置を求めることになる。初期地山状態での有限要素分割図を図2に示す。



キーワード:切羽前方、三次元線形弾性体、有限要素解析、ヤング係数、共役勾配法 連絡先:〒112-8551 東京都文京区春日1-13-27 中央大学大学院理工学研究科 TEL 03-3817-1814

4. 解析結果

今回は理想モデルを用いたので、図3のようにトンネル坑口(X=0m)から X=14m までを健全な地山、X=14m から X=20m までを軟弱な地山とした。なお、荷重は周辺等圧 $P = 10kN/m^2$ 、ポアソン比v = 0.20、トンネルの 直径 D = 4m とした。観測データは掘削表面上の天盤とスプリングラインの二点でのトンネル軸方向変位と内空変 位を用いた。今回は順解析により得られた変位を観測データとした。

4.1 数值解析例1

まず、6 mから8 mまで掘削時の同定計算例を示す。図4のよう にモデルを4つの領域に分割し、各層のヤング係数を同定した。こ の例の場合、地山境界と層の分割が同じラインにある。ヤング係数 の初期値はすべての層で1000kN/m²とした。図5は各層の同定 されたヤング係数の値を示している。結果よりすべての層が目的値 にほぼ収束し健全な地山、あるいは軟弱な地山であることが予測き た。そして、Layer3 と Layer4 の境界に地山境界があることがわ かった。



4.2 数值解析例2

次に、同じく6mから8mまでの掘削時の同定計算であるが、図 6のようにLayer3が地山境界にまたがっている場合を考える。図 7の結果よりLayer3以外の層は目的値にほぼ収束し、地山の強度 をはっきり予測できたが、Layer3のヤング係数が初期値からあま り大きな変化を見せず、鈍い反応であった。つまり、Layer3付近 に地山境界があることが予測できた。



図4 例1のモデルにおける層分割図 Layer1 Layer2 Layer3 Layer4 E=2000 kN/m² 6m 8m 0m 11m 13m 15m 20m i Soft layer × observed points

図6 例2のモデルにおける層分割図



5. 終わりに

掘削表面上の内空変位計測データのみで、トンネル切羽前方の地質を予測することができた。つまり、特殊な物 理探査計測機器を必要とすることなく、また、掘進作業を併用しながら日常的な施工管理の一環として、地盤掘削 部前方の地質を予測することが可能である。本手法は実際のデータを用いての検証を行うとともに、実際の現場で 適用してみる予定である。

参考文献

- ・桜井春輔、武内邦文:トンネル掘削時における変位計測結果の逆解析、土木学会論文報告集 第337号 1983年9月
- R.Fletcher and C.M.Reeves., Function Minimization by Conjugate Gradients, Computer J., pp149-154 (1964)