

大阪大学工学部 正員 久 武 勝 保

大阪工業大学 正員 伊 藤 富 雄

大阪大学大学院 学生員 上久保 裕 介

1. 緒論

最近、トンネル掘削に起因する覆工及び地山の変位を計測し、それを用いて覆工の安全性や地山の初期応力・材料定数を推定して以後の設計、施工に役立たせるいわゆる逆解析法に関する研究が行なわれるようになってきた。^{1,2)} 直接定式化法による逆解析法³⁾は定式化が簡単であるものの、繰り返し計算を必要とし、特に三次元問題を扱う場合には計算コストが膨大となり実用的でない。そこで、本研究では現場への適用性をより一層高めるため、計算回数が2回でよく、かつ、トンネル軸方向変位を計測する必要のない逆解析法を提案する。

2. 解析手法

トンネル問題では切羽の支持効果を考慮する必要があるため、本研究では三次元解析を行っており、図-1に以下で用いた要素分割図を示す。地山及び覆工は弾性体と仮定し、地山の弾性係数 $E_g = 50000 \text{ t/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu_g = 0.3$ 、覆工の弾性係数 $E_r = 1000000 \text{ t/m}^2$ 、ポアソン比 $\nu_r = 0.15$ である。次に表-2のようにすべての節点力及び節点変位を4種類に分類すれば、有限要素法(FEM)における剛性方程式は次式で表わされる。ただし既知量には*をつけた。

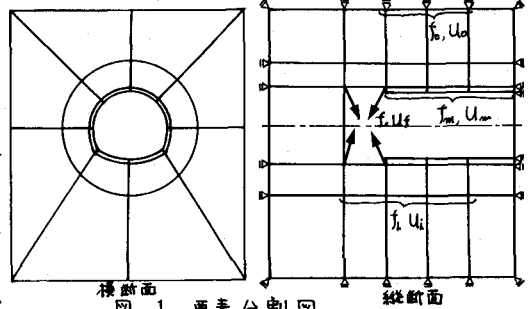


図-1 要素分割図

表-2 節点力及び節点変位の分類

f : 掘削解放節点力	u : 解放節点力がかかる節点の変位
f_0 : 節点の固定方向に働く力	u_0 : 節点の固定方向の変位
f_n : メッシュ内部の節点力	u_n : メッシュ内部の節点変位
f_m : 覆工内面の節点力	u_m : 覆工内面の節点変位

$$\begin{Bmatrix} f \\ f_0 \\ f_n \\ f_m \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} \end{Bmatrix} \begin{Bmatrix} u \\ u_0 \\ u_n \\ u_m \end{Bmatrix} \quad (1)$$

式(1)において、 $\{f_n^*\} = \{f_m^*\} = \{u_0^*\} = 0$ であることを考慮すれば、 f は次のように既知変位で表現される。

$$\{f\} = [-\{k_{11} \ k_{13}\} \begin{Bmatrix} k_{31} & k_{33} \\ k_{41} & k_{43} \end{Bmatrix}^{-1} \begin{Bmatrix} k_{34} \\ k_{44} \end{Bmatrix} + \{k_{14}\}] \{u_m^*\} \quad (2)$$

ただし、 $\{u_m^*\}$ の成分数が $\{f\}$ の成分数より多い場合には式(2)に最小自乗法を適用することになる。²⁾ 式(2)から、切羽での解放節点力 $\{f\}$ が未知の E_g, ν_g の関数となっていることがわかる。

従来の直接定式化法による逆解析法では、掘削解放節点力 f の値を仮定して変位 u_f を解析し、これと測定される節点変位 u_f^* を使って $J_1 = \sum_{j=1}^{Nu} (u_{fj}^* - u_{fj})^2$ (Nu は、計測変位の数)なる誤差関数 J_1 を定義し、 J_1 を最小ならしめる材料定数を真値としていた。ところが f は地山の初期応力及び既に打設した覆工の地圧の影響を受けるので、 f を精度良く仮定する事は困難であり、また f の値が間違えておれば、得られる材料定数も正しい値ではなくなる。そこで本研究では、掘削要素に作用していた掘削前の節点力は釣り合っており、したがって式(2)で得られる解放節点力 $\{f\}$ は E_g, ν_g が真値のときとは釣り合いを保たずであると見え、目的関数 J_2 として、以下の鉛直方向の力の釣り合い条件式を定義した。

$$J_2 = \sum f_{\text{ver}} - W \quad (f_{\text{ver}} \text{は式(2)から得られるトンネル鉛直方向の解放節点力, } W \text{は掘削土重量}) \quad (3)$$

尚、掘削土重量の値は、土被り比が大であれば、 f_{ver} の値に比べて小なので、 W は無視することができる。

3. 解析結果及び考察

まず E_g の初期値を 70000 t/m^2 に選び、覆工内面変位のすべてが測定されたとし、これを式(3)にインプットして、シンプレックス法により、 J_2 の最小点及びその点に対する E_g の値を求めた。その収束状況を図-3に示す。 E_g の真値 50000 t/m^2 に対し、 49605 t/m^2 と非常に精度の高い結果が得られた。即ち、式(3)を用いて地山の材料定数を精度よく推定できることが確認できた。しかしシンプレックス法では繰り返し回数は一見少ないが、通常の三次元FEM解析は9回行っており、これは計算時間の上で大きな障害となる。

ところで E_g と J_2 の間には線形関係が存在することは著者らにより理論的に示されている。⁴⁾ そこでこの関係を利用すれば、2組の (E_g, J_2) の値から $J_2 = aE_g + b$ の定数 a, b が決定でき、したがって $J_2 = 0$ を与える E_g の真値 $\bar{E}_g$ が $\bar{E}_g = -(b/a)$ により求まることになる。例えば、本問題において幾つかの (E_g, J_2) の値をプロットした結果が図-4であるが、これから直線関係が成立していることが確認できる。

そこで E_g の値として 70000 t/m^2 と 100000 t/m^2 の2つを用い、以下の4つのCaseについて上記の手法により、 $\bar{E}_g$ の値を推定してみた。

Case 1; 覆工内面変位の全成分をインプットデータとした場合。

Case 2; 実際の現場では、トンネル軸方向変位は計測されないのので、これに対処するため、軸方向変位は未知として式(1)の U_i に含め、それ以外の覆工内面変位のみをインプットして解析した場合。

Case 3; 現場計測変位にある程度の誤差が含まれるのは不可避であることから、Case 2の場合において、切羽最近の覆工内面変位のうちの4成分に5%の誤差を与えて解析を行なった場合。

Case 4; 今までの議論は地山のポアソン比 ν_g に真値0.3を与えて解析を行ってきたが、 ν_g に誤差を与え、 $\nu_g = 0.4$ としてCase 2と同様の解析を行なった場合。

以上各Caseの解析結果を表-5に示す。Case 1, Case 2については $\bar{E}_g$ が精度よく求まっており、Case 3では入力変位の誤差の影響を受け、当然の事ながら精度はやや落ちている。しかし工学的に、十分使用に耐える値である。またCase 4の結果よりポアソン比 ν_g の誤差は $\bar{E}_g$ の値に対しほとんど影響しないことがわかる。

4. 結論

以上の結果をまとめると、下記の通りである。

- ① 掘削要素に対する力の釣り合い条件を目的関数 J_2 に選び、これを最小化することにより $\bar{E}_g$ の推定が可能である。
- ② 2組の (E_g, J_2) の値を用いて $\bar{E}_g$ の推定が可能である。
- ③ 軸方向変位を用いなくても $\bar{E}_g$ の推定は可能である。
- ④ 地山のポアソン比の誤差が $\bar{E}_g$ の推定値に与える影響は小である。

(参考文献) 1) Hisatake, M. and Ito, T.: Back Analysis Methods to Tunnel Linings, Proc. Int. Symp. Field Measurement, Geomech, Zürich, 1983. 2) 久武・伊藤・大田: トンネル問題における三次元逆解析法, 第16回岩盤力学に関するシンポジウム, 1984. 3) 久武・伊藤・上原・加藤: 第19回土質工学研究発表会講演概要集, 1984. 4) 久武・大田: 第39回土木学会年次学術講演概要集, 第3部, 1984.

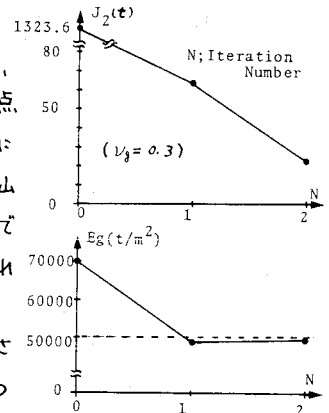


図-3 J_2 及び E_g の収束状況

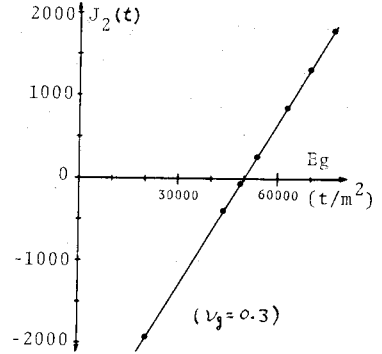


図-4 E_g と J_2 の直線関係

表-5 各Caseにおける $\bar{E}_g$ の推定値

CASE	E_g (t/m^2)	J_2 (t)	$\bar{E}_g$ (t/m^2) ERROR(%)
1	70000	1323.6	49906.9
	100000	3299.8	(0.1862)
2	70000	12988	51651.9
	100000	34224	(3.3038)
3	70000	19221	43138.8
	100000	40688	(13.722)
4	70000	17207	49686.4
	100000	42619	(0.6272)