

神戸大学 正会員 桜井春輔
神戸大学 学生員 ○ 武内邦文

1. はじめに

地下空洞の施工に先立ち試験坑が掘削され現場計測が行なわれるならば、その計測結果は地下空洞の設計・施工に貴重な情報となる。しかし現在の段階では、試験坑における計測結果を本断面の設計に合理的に適用する方法は確立されていないように思われる。

本研究では試験坑掘削により生じた周辺地山の変位が現場計測されるとして、有限要素解析変位法の定式化により初期応力および地山の物性値を逆解析する手法を提案し、さらに計算機シミュレーションによりその手法の妥当性を検討する。この方法によると繰り返し計算を必要とせず、測定変位から最小二乗法を用いて一意的に地山の物性値および初期応力を求めることができる。なおこの方法によって求める値は、地山全体を等方等質の線形弾性体と仮定した時の弾性係数(ヤング率)および初期応力比(二次元状態の場合は σ_{x0} , σ_{y0} , τ_{xy0} の比率 $\alpha = \sigma_{x0}/\sigma_{y0}$ および $\beta = \tau_{xy0}/\sigma_{y0}$ の2個の定数)である。初期応力および地山の物性値が求められると、それらを用いて本断面の解析が可能となる。¹⁾さらに得られるひずみを破壊ひずみと比較することによって地下空洞の安全性を検討することができる。²⁾

2. 逆解析法の基礎式

以下の基礎式の誘導の際に用いる仮定を列記する。

①地山全体(全ての要素)が等方等質の線形弾性体かつヤング率 E が等しいとする。またポアソン比 ν は既知であるとする。

②初期応力比 α および β はあらゆる場所(地下空洞掘削部分)で一一定であり、かつ σ_{y0} (垂直方向応力)は土被り高さに等しく既知であるとする。

有限要素解析の定式化は次式で示される。

$$\{P\} = [K]\{u\} \quad (1)$$

①の仮定を考慮すれば(1)式は次式となる。

$$\{P\} = E[K_n]\{u\} \quad (2)$$

地下空洞掘削問題を考える場合には、掘削部分の初期応力を解放する必要がある。有限要素解析の場合には初期応力より掘削相当節点力を次式により計算し、それを周辺地山に節点力として載荷する。

$$\{P\} = \int_V [B]^T \{\sigma_0\} dV \quad (3)$$

$$\text{ここで、} \{\sigma_0\} = \begin{Bmatrix} \sigma_{x0} \\ \sigma_{y0} \\ \tau_{xy0} \end{Bmatrix} \quad (4) \quad \text{②の仮定より、} \{\sigma_0\} = \begin{Bmatrix} \alpha \cdot \sigma_{y0} \\ \sigma_{y0} \\ \beta \cdot \sigma_{y0} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

(5)式を(3)式に代入すれば次式となる。

$$\{P\} = \alpha \int_V [B_1]^T \cdot \sigma_{y0} dV + \int_V [B_2]^T \cdot \sigma_{y0} dV + \beta \int_V [B_3]^T \cdot \sigma_{y0} dV \quad (6)$$

(6)式を次式のように置くと、掘削相当節点力は定数 α および β を用いて3個に分割できる。

$$\{P\} = \alpha \{P_1\} + \{P_2\} + \beta \{P_3\} \quad (7)$$

(7)式を(2)式に代入して、最小二乗法により E , α , および β を求めればよい。この方法において入力データは計測変位 $\{u\}$, 要素分割による節点の x および y 座標, 各要素のポアソン比および初期垂直方向応力 σ_{y0} であり、出力結果は地山全体のヤング率 E と初期応力比 α および β である。

3. 提案する逆解析法の妥当性の検討

現場計測データは誤差を含むのが当然である。その誤差が逆解析の出力結果に大きく影響すれば、その手法は安定性を欠き実用的でない。そこでこの手法の数値計算上の安定性を検討するためシミュレーションを行った。

まず図-1に示す有限要素モデルにより節点変位を計算した。用いた条件は、等方等質の二次元平面ひずみ状態における地下空洞を想定した線形弾性体を仮定し、全ての要素で $E = 10,000 \text{ kg/cm}^2$, $\nu = 0.3$, 要素特性はアイソパラメトリック8節点要素, 初期応力は $\sigma_{x0} = -5.0 \text{ kg/cm}^2$, $\sigma_{y0} = -10.0 \text{ kg/cm}^2$, $\tau_{xy0} = -2.0 \text{ kg/cm}^2$ である。

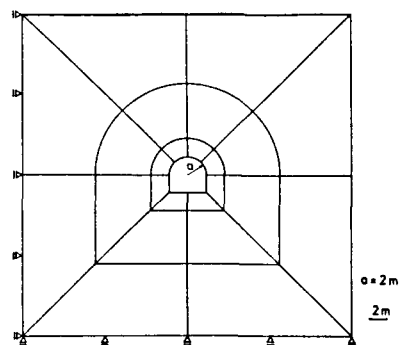


図-1 モデルの要素分割図

図-2はモデルの正解値としての変位を入力し、ポアソン比を変化させた逆解析の出力結果である。なお結果は正解値で正規化してある。図-3は各節点変位に誤差を含ませた場合のヤング率の出力結果である。なお各変位の誤差はモデルの正解値の前後に正規乱数を発生させて得たもので、図中横軸は各変位の標準偏差の変位の正解値に対する百分率で示している。図-4および図-5は図-3と同様に、各変位に誤差を含んだ場合の初期応力比 α および β のばらつきの程度を示す。

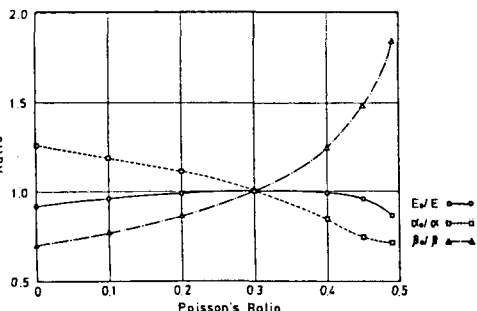


図-2 逆解析の出力結果に及ぼすポアソン比の影響

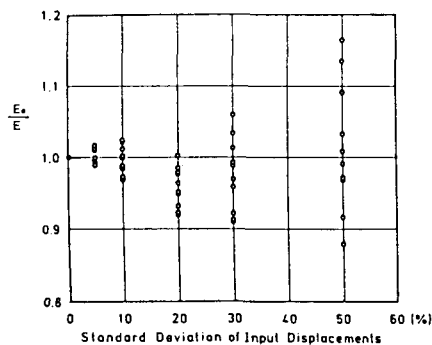


図-3 ヤング率Eに及ぼす入力変位の影響

4. おわりに シミュレーションの結果より

ポアソン比および節点変位に誤差を含む場合でも、逆解析の結果は、条件の悪い時でさえ、 $\pm 40\%$ 以内、平均的には $\pm 10\%$ 以内におさまる。また変位に注

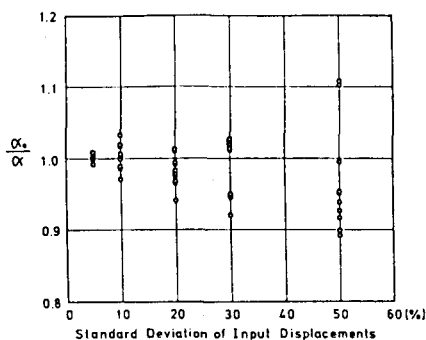


図-4 初期応力比 α に及ぼす入力変位の影響

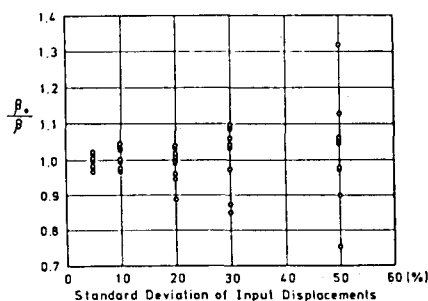


図-5 初期応力比 β に及ぼす入力変位の影響

目すれば、各変位の標準偏差の百分率50%は非常に大きな誤差である。そのような悪条件下においても上記のような出力結果の安定性を示すので、ここで提案する逆解析手法は十分に実用可能といえる。なお実際の地下空洞における現場計測変位データにこの手法を適用した逆解析の例は当日に発表する。

〔参考文献〕

- 1) S. Sakurai & S. Abe: Proc. 3rd Int. Conf. Numerical Methods in Geomechanics, Aachen, 1979
- 2) 桜井寿輔: 土木学会論文報告集, No. 317, 1982