

III-587

楕円形トンネルを有する線形粘弾性岩盤の逆解析

山梨大学大学院 学生員○柴田善央
清水建設(株) 正会員 熊坂博夫
清水建設(株) 正会員 桜井英行
山梨大学工学部 正会員 平島健一

1. はじめに

地下構造物等の設置・施工に際し、地山の力学特性を正確に把握することは安全性、安定性に対し極めて重要であり、種々の現場計測結果から地山の力学特性を推定するための逆解析が行われてきた。

これまでに提案された逆解析法のうち、理論的厳密解による場合は弾性体を仮定し、かつトンネル断面形は円形断面、荷重状態は静水圧としたものが多い。本論文では著者らのこれまでの成果を踏まえて、面内荷重、面外荷重あるいは面内集中力、面外集中力が作用する問題に対する線形粘弾性体の円形・楕円形の素掘りトンネル周辺における応力、変位等を求めた厳密解としての順解析を応用し、トンネル周辺位置での時間経過に伴う変位計測値から地山の变形係数や初期応力等を推定する逆解析法と、具体的な数値結果を提示する。

2. 解析理論

2-1 内部に楕円形境界を有する線形粘弾性問題の解

粘弾性問題に対する対応原理と著者らの論文^{1),2)}を利用すれば、一般的な線形粘弾性モデルに対する閉じた型の解析解が得られる。したがって弾性厳密解における弾性定数を時間的な荷重作用形式や粘弾性モデルに対応したもの置き換えればよい。Fig.1に示すBurgersモデルの場合、以下のような項が現れるが、それらのLaplace変換型を示す。なお、Laplace逆変換は通常の数学公式集を用いて陽な形で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}\left[\frac{1}{E}H(t)\right] &= \frac{1}{Es} = \frac{6K\tau_1\tau_2 + \tau_1\eta_2}{9K\tau_1\eta_2} \cdot \frac{s^2 + a_0s + b_0}{s^2(s + \alpha)}, \\ \mathcal{L}\left[\frac{\nu}{E}H(t)\right] &= \frac{\bar{\nu}}{Es} = \frac{3K\tau_1\tau_2 - \tau_1\eta_2}{9K\tau_1\eta_2} \cdot \frac{s^2 + a_1s + b_1}{s^2(s + \alpha)}, \\ \mathcal{L}\left[\frac{\nu^2}{E}H(t)\right] &= \frac{(\bar{\nu})^2}{Es} \\ &= \frac{(3K\tau_1\tau_2 - \tau_1\eta_2)^2}{9K\tau_1\eta_2(6K\tau_1\tau_2 + \tau_1\eta_2)} \cdot \frac{(s^2 + a_1s + b_1)^2}{s^2(s + \alpha)(s^2 + a_0s + b_0)} \dots (1) \\ &= \frac{(3K\tau_1\tau_2 - \tau_1\eta_2)^2}{9K\tau_1\eta_2(6K\tau_1\tau_2 + \tau_1\eta_2)} \cdot \left\{ \frac{s^2}{(s + \alpha)(s + \beta)(s + \gamma)} \right. \\ &\quad \left. + 2a_1 \cdot \frac{s^3 + \frac{a^2 + 2b_1}{2a_1}s^2 + b_1s + \frac{b_1^2}{2a_1}}{s^2(s + \alpha)(s + \beta)(s + \gamma)} \right\} \end{aligned} \right\}$$

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{L}\left[\frac{1}{2G}H(t)\right] &= L\left[\frac{1 + \nu}{E}H(t)\right] \\ &= \frac{6K\tau_1\tau_2 + \tau_1\eta_2}{6K\tau_1\eta_2} \cdot \frac{s^2 + a_0s + b_0}{s^2(s + \alpha)} \\ &\quad + \frac{6K\tau_1\tau_2 - \tau_1\eta_2}{9K\tau_1\eta_2} \cdot \frac{s^2 + a_1s + b_1}{s^2(s + \alpha)} \end{aligned} \right\} \dots (2)$$

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= \frac{1}{\tau_1}, \beta, \gamma = \frac{-1}{2} \left\{ -a_0 \pm \sqrt{a_0^2 - 4b_0} \right\}, \tau_1 = \frac{\eta_1}{G_1}, \tau_2 = \frac{\eta_2}{G_2} \\ a_0 &= \frac{6K(\tau_1 + \tau_2 + \frac{\eta_2}{G_1}) + \eta_2}{6K\tau_1\tau_2 + \tau_1\eta_2}, \quad b_0 = \frac{6K}{6K\tau_1\tau_2 + \tau_1\eta_2}, \\ a_1 &= \frac{3k(\tau_1 + \tau_2 + \frac{\eta_2}{G_1}) - \eta_2}{3K\tau_1\tau_2 - \tau_1\eta_2}, \quad b_1 = \frac{3K}{3K\tau_1\tau_2 - \tau_1\eta_2} \end{aligned} \right\} (3)$$

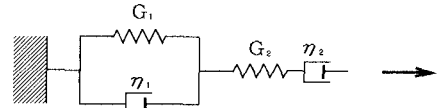


Fig.1 Burgers model

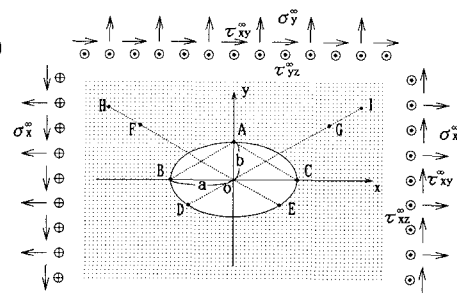


Fig.2 Geometries of the problem and applied initial stress components at infinity.

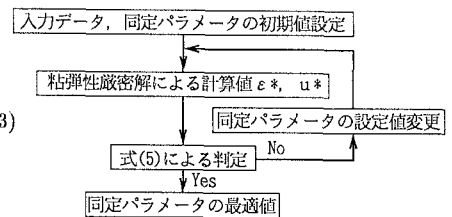


Fig.3 Flowchart of back analysis.

2-2 楕円形トンネルを有する粘弾性岩盤の逆解析^{3),4)}

ここで採用する粘弾性モデルとして、前節のBurgers-Elasticモデルを採用する。同定パラメータは面内荷重問題に対し、Fig.1における $\nu_1, \nu_2, \eta_1, \eta_2$, 体積弾性係数 K , および σ_x^∞ とし、同様に面外せん断荷重問題に対し、 $\nu_1, \nu_2, \eta_1, \eta_2$, 地山の面外荷重 τ_0^∞ , 作用方向角 ϕ とする。

入力データは、Fig.2においてA-B, A-C, B-C, O-A各測点で測定された変位量 $\Delta L_{AB}, \Delta L_{AC}, \Delta L_{BC}, \Delta L_{OA}$ とし、次に示すD-G, E-F, G-I, F-H間の半径方向変位とする。

$$\varepsilon_{AB} = \frac{\Delta L_{AB}}{L_{AB}}, \varepsilon_{AC} = \frac{\Delta L_{AC}}{L_{AC}}, \varepsilon_{BC} = \frac{\Delta L_{BC}}{L_{BC}}, \varepsilon_{OA} = \frac{\Delta L_{OA}}{L_{OA}}. \quad \dots\dots (4) \quad \text{Table3 The inverse solution for Table5-1.}$$

D-G, E-F, G-I, F-H間の半径方向変位をそれぞれ $u_{r1}, u_{r2}, u_{r3}, u_{r4}$ とし、以上の8データを入力する。

厳密解に前述の同定パラメータを与えることにより求めたA~I各点の変位を ε^*, u^* とする。さらにFig.3に示すように同定パラメータを変化させて入力データ ε, u とこれらの値との関係が次の関係を満たすまで繰り返し計算を行い、最適な同定パラメータを決定する。

$$\left. \begin{aligned} &(\varepsilon_{AB} - \varepsilon_{AB}^*)^2 + (\varepsilon_{AC} - \varepsilon_{AC}^*)^2 + (\varepsilon_{BC} - \varepsilon_{BC}^*)^2 + (\varepsilon_{OA} - \varepsilon_{OA}^*)^2 \\ &+ (u_{r1} - u_{r1}^*)^2 + (u_{r2} - u_{r2}^*)^2 + (u_{r3} - u_{r3}^*)^2 + (u_{r4} - u_{r4}^*)^2 < \varepsilon_{er} \end{aligned} \right\} \dots\dots (5)$$

ここに、 ε_{er} は許容誤差を表す。

面外問題に対しても、奥行き方向の変位を入力データとし、同様の方法で算定することができる。

3. 数値計算例

上述の方法を用いた逆解析の一例を示す。Table2、Table3はそれぞれ面内問題、面外問題の入力データを示す。t=1日目と2日目における各地点の変位計測値を用いた。

Table4、Table5は、それらの入力データを用いた場合の逆解析結果を示す。誤差の二乗和は 10^{-10} 程度となり、ひずみのオーダーが 10^{-3} であることから判断して良好な結果となっている。

4. おわりに

本論文では、線形粘弾性体内に掘削された円形または楕円形トンネル周辺の応力、変位に対する厳密解を応用し、その逆解析法を提示した。十分長いトンネルに対して任意方向傾斜の3次元的な主応力荷重の一部分と変形係数を算定することができた。

参考文献

- 1) 平島・木村・広瀬：だ円形の空孔または剛体介在物を有する面内・面外問題の解析解とその応用(第1報，等方性面内問題に対する基礎理論)，日本機械学会論文集(A編)，Vol.57, No.540, pp.1897~1904, 1991.
- 2) 平島・木村・広瀬：だ円形の空孔または剛体介在物を有する面内・面外問題の解析解とその応用(第2報，等方性面内問題に対する数値計算例)，日本機械学会論文集(A編)，Vol.57, No.542, pp.2516~2522, 1991.
- 3) 平島・川上・藤原・山下：弾性厳密解に基づく円形・楕円形トンネルを有する等方性および異方性岩盤の逆解析，土木学会論文集，No.439/III-17, pp.1~8, 1991.
- 4) 平島・川上・藤原・山下：面外せん断荷重下の等方性・異方性弾性岩盤内の素掘トンネル掘削問題に関する順解析および逆解析，土木学会論文集，No.436/III-16, pp.37~45, 1991.

Table1 Input data for strains and displacements.

day	ε_{AB}	ε_{AC}	ε_{BC}	ε_{OA}	u_{r1}	u_{r2}	u_{r3}	u_{r4}
1 day	0.628E-05	-0.872E-05	0.628E-05	0.479E-04	0.135E-03	0.135E-03	0.830E-05	0.830E-05
7 days	0.126E-04	-0.899E-05	0.126E-04	0.727E-04	0.212E-03	0.212E-03	0.157E-04	0.157E-04

Table2 Input data for strains.

day	ε_{AB}	ε_{AC}	ε_{BC}	ε_{OA}
1 day	0.110E-03	-0.641E-04	-0.495E-12	0.107E-03
7 days	0.190E-03	0.111E-03	-0.856E-12	0.185E-03

$$G_1 = 0.2100E+05 \quad G_2 = 0.5000E+05$$

$$\eta_1 = 0.5900E+08 \quad \eta_2 = 0.3810E+10$$

$$\beta = 0.4500E+02 \quad \tau = 0.1414E+01$$

$$\text{誤差}^2 = 0.9239E-11$$

Table4 The inverse solution for Table5-2.

$$G_1 = 0.2100E+05 \quad G_2 = 0.5200E+05$$

$$\eta_1 = 0.5000E+08 \quad \eta_2 = 0.4700E+10$$

$$K = 0.5100E+05 \quad \sigma_x = 0.0000E+00$$

$$\text{誤差}^2 = 0.2865E-10$$