

III-B 90

各種の断面形状のトンネルを有する
粘弾性岩盤の逆解析

金沢大学教育学部 正員 柴田善央
山梨大学工学部 正員 平島健一
大林組技術研究所 正員 山下幸夫

1. まえがき

著者らはこれまでに各種の断面形状のトンネルを有する粘弾性岩盤を対象とした、トンネル境界周辺の応力、変位状態を求める解析解を導出している¹⁾²⁾。本研究ではこれらの理論を、いわゆる順解析のための理論解として用い、トンネル問題を対象とした時間経過に伴うトンネル周辺の変位挙動から地山の力学定数や初期応力を推定する逆解析法を提示し、図1に示す国道289号駒止トンネル建設時に測定された内空変位計測データを用いて逆解析を実施し、その有用性を示す。

本逆解析法の特徴として、まず地山を粘弾性と仮定することにより、計時計測データを活用することができることである。さらに、地山荷重条件として、図2のような、いわゆるRamp型の荷重が作用する場合を考えることにより、切羽の進行が変位に及ぼす影響を考慮できるものである。

2. 順解析法

解析手法は弾性体と粘弾性体の間に成立する“対応原理”を適用することによって、弾性解に現れるせん断弾性係数G（または弾性係数E）およびポアソン比 ν を各々の粘弾性モデルにしたがった適切な置き換えを行うことにより、標記の粘弾性体問題の厳密解を導出するもので、覆工のない素掘りトンネルの場合、弾性解は重ね合わせの手法により次式で求められる。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_x &= \sigma_x^\infty + \sigma'_x, & \sigma_y &= \sigma_y^\infty + \sigma'_y, & \sigma_z &= \sigma_z^\infty + \sigma'_z, \\ \tau_{xz} &= \tau_{xz}^\infty + \tau'_{xz}, & \tau_{yz} &= \tau_{yz}^\infty + \tau'_{yz}, & \tau_{xy} &= \tau_{xy}^\infty + \tau'_{xy}, \\ u &= u^\infty + u', & v &= v^\infty + v', & w &= w^\infty + w'. \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

ここに $\sigma_x^\infty, \sigma_y^\infty, \dots, \tau_{yz}^\infty$ は孔から十分離れた応力の成分であり、また応力 $\sigma'_x, \sigma'_y, \tau'_{xy}, \tau'_{xz}, \tau'_{yz}$ 、および変位 u', v', w' は複素解析関数 $\Phi_1(z), \Phi_2(z)$ および $\Phi_3(z)$ を用いて、既発表論文²⁾に与えている。上式中に現れる弾性定数、ポアソン比に関連する項を $F(t)$ 、図2に示すramp型荷重を $R(t)$ と表示すると、Laplace変換解は次式で与えられる。

$$F(t) \cdot R(t) = \frac{1}{t_0} \{f(t) - f(t-t_0)\}, f(t) = L^{-1} \left[\frac{1}{s^2} \bar{F}(s) \right]. \dots\dots\dots (2)$$

粘弾性体として、偏差成分に関しBurgersモデルを、また体積成分に関しElasticモデルを採用したとき、例えば $F(t) = \frac{1}{E}$ に対して式(2)の $f(t)$ は次式で表される。

$$f(t) = \frac{6K\tau_1\tau_2 + 2\tau_1\eta_2}{18K\tau_1\eta_2} \left\{ \frac{a_0\alpha - \alpha^2 - b_0}{\alpha^3} e^{-\alpha t} + \frac{b_0}{2\alpha} t^2 + \frac{a_0\alpha - b_0}{\alpha^2} t + \frac{\alpha^2 - a_0\alpha + b_0}{\alpha^3} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

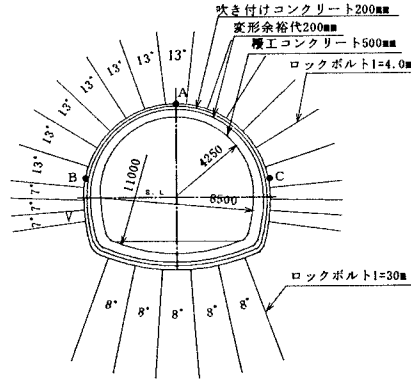


図1 問題の幾何形状と逆解析における

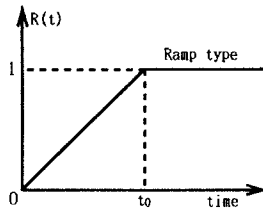


図2 載荷荷重の形状

表1 長時間圧縮クリープ試験から求めた粘弾性定数

G_1 (kgf/cm ²)	2.96E+03
G_2 (kgf/cm ²)	7.54E+03
η_1 (kgf/cm ² min)	4.08E+07
η_2 (kgf/cm ² min)	2.21E+09
K (kgf/cm ²)	2.45E+03

表2 内空変位計測値から求めた入力データ

ϵ ij	5days	10days	30days
ϵ AB	0.307E-02	0.528E-02	0.120E-01
ϵ AC	0.630E-03	0.142E-02	0.441E-02
ϵ BC	0.245E-02	0.419E-02	0.101E-01

3. 逆解析法

トンネルの断面形状および計測点を図1に示す。面内問題において、例えば A-B 間変位の変化量を $\Delta L_{AB} (= u_A^* - u_B^*)$ とし、この ΔL_{AB} を A-B 間の距離 L_{AB} で割った値を見かけのひずみ ϵ_{AB} として定義する。したがって、同様のひずみが次のように表示される。

$$\epsilon_{AB} = \frac{\Delta L_{AB}}{L_{AB}}, \epsilon_{AC} = \frac{\Delta L_{AC}}{L_{AC}}, \epsilon_{BC} = \frac{n\Delta L_{BC}}{L_{BC}}. \dots\dots\dots (4)$$

同定すべきパラメータを系統的に仮定して解析解に代入することにより ϵ_{ij}^* ($i, j = A, B, C \dots$) を計算した後、次式を用いてこれらのパラメータの最適値を求める。

$$(\epsilon_{AB} - \epsilon_{AB}^*)^2 + (\epsilon_{AC} - \epsilon_{AC}^*)^2 + \dots < (\epsilon_{er}^*)^2. \dots\dots\dots (5)$$

ここに、 ϵ_{er}^* は許容誤差である。パラメータの最適化の方法としては各種の方法が考えられているが、ここでは関数値の変化と各変数の変化率の最大値とがそれぞれ与えられた上限値より小さくなるまで反復計算し、最適値を同定する Davidon の方法を用いた⁴⁾。

4. 数値計算例

国道 289 号駒止トンネル付近の地質は、緑色凝灰岩と石英安山岩質熔結凝灰岩からなる。土被りに対して地山の物性値が低く、膨張性挙動を呈する地山である⁵⁾。トンネル施工にあたり長時間圧縮クリープ試験が実施されており、Burgers-Elstic モデルの粘弾性定数を求めた結果を表1で与えられる³⁾。ここでは上半掘削時の断面を用いて逆解析を実施した。解析条件として、地山自重は単位体積重量および土被り厚から仮定した。また、支保の建て込み行程を考慮して切羽到達前 $t=-10$ 日から変位が生じると仮定し、 $t_0 = 10$ 日とした Ramp 型荷重が作用するものとした。地中変位を計測されている断面3について、その位置における内空変位計測データから求めた入力値を表2に示す。掘削後計測器が設置された後5日目、10日目、30日目におけるデータを用いた。それらの入力データから逆解析を行い同定された結果を表3に示す。また、それらの同定されたパラメータを用いて厳密解から求めた内空変位と実測値との比較を図3に示す。このような各測線の変位量に大きな差が見られる場合においても十分一致する結果が得られた。

3)。ここでは上半掘削時の断面を用いて逆解析を実施した。解析条件として、地山自重は単位体積重量および土被り厚から仮定した。また、支保の建て込み行程を考慮して切羽到達前 $t=-10$ 日から変位が生じると仮定し、 $t_0 = 10$ 日とした Ramp 型荷重が作用するものとした。地中変位を計測されている断面3について、その位置における内空変位計測データから求めた入力値を表2に示す。掘削後計測器が設置された後5日目、10日目、30日目におけるデータを用いた。それらの入力データから逆解析を行い同定された結果を表3に示す。また、それらの同定されたパラメータを用いて厳密解から求めた内空変位と実測値との比較を図3に示す。このような各測線の変位量に大きな差が見られる場合においても十分一致する結果が得られた。

5. おわりに

実際のトンネル建設において実施された内空変位計測データを使用し、本研究で同定した厳密解を順解析解として用いた逆解析を行った。岩石試験結果と比較し、地山の粘弾性定数として良好な値を同定することができたと考えられる。

参考文献

- 1) 平島健一・熊坂博夫・桜井英行・柴田善央：二次元面内荷重下での円形・楕円形トンネルを有する粘弾性岩盤の変位解析，土木学会論文集，No.475/III-24，pp.29~37，1993.9
- 2) 柴田善央・平島健一・壁谷聡浩：準三次元地山荷重下での任意形状トンネルを有する粘弾性地山の変位解析および逆解析，日本材料学会「材料」（掲載決定）
- 3) Goodman, R.E.: Introduction to Rock Mechanics, Second Ed., John Wiley and Sons, (1989).
- 4) 小谷恒之：非線形多変数関数の極小化，大阪大学大型計算機センター・ニュース，No.32，pp.27~48,1979.
- 5) 斉藤二郎・藤原紀夫・山下幸夫：有限要素法による NATM トンネルの挙動解析例，第15回土質工学研究発表会，pp.1561~1564,1980.6.

表3 逆解析結果

G_1 (kgf/cm ²)	1.06E+03
G_2 (kgf/cm ²)	2.77E+02
η_1 (kgf/cm ² min)	7.81E+06
η_2 (kgf/cm ² min)	1.03E+08
K (kgf/cm ²)	1.33E+03
$\sigma_1^\infty / \sigma_2^\infty$	0.47
θ (deg.)	-68.5
(error) ²	0.517E-06

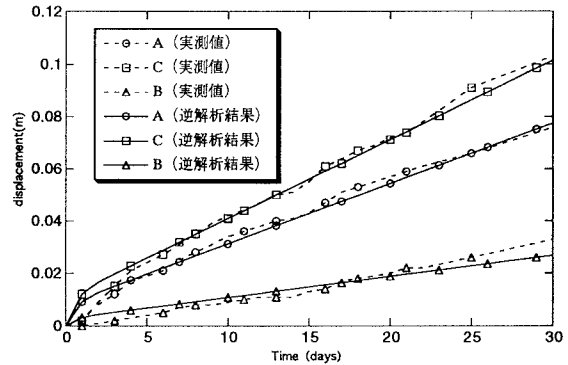


図3 内空変位の計測値と逆解析結果の比較