

軟岩トンネル挙動に関する一考察

近畿大学理工学部 正会員 ○久武 勝保
 石黒建設(株) 松本 浩和
 (株)シーイーシー 上村 和伸

1. 緒論

軟岩トンネルでは、地山強度比の小なる程膨張性を呈するが、その程度については通常、弾塑性解析によっている。しかし、このような解析は、塑性を呈するところの変位は大であるが、そうでないところの変位は非常に小となり、現場で観察される軟岩トンネルの膨張特性と相当異なった結果を与えることが指摘される。そこで本研究では、軟岩トンネルの膨張特性を解明し、合理的な支保条件を決定するために、以下に示す軟岩の諸特性を考慮した等方初期応力(P)下の円形トンネル解析を理論的に行うこととする。

- 1) 降伏条件式が非線形性を示す。
- 2) 応力・ひずみ関係が非線形性を示す。
- 3) 初期接線せん断弾性係数(G_i)の値は、拘束圧の影響を受ける。
- 4) G_i と強度の比は拘束圧の影響を受けない。

また、軟岩地山を想定したトンネル模型実験結果¹⁾と、弾塑性解析結果、本非線形解析結果の比較を通して、妥当な解析手法について検討する。

2. 解析手法

軟岩の応力-ひずみ関係は、通常非線形性を示すことが知られている。そこで、八面体平面上でのせん断応力 τ_{oct} とせん断ひずみ γ_{oct} の関係をKondner²⁾の双曲線式で表現し、これを用いる。

$$\tau_{oct} = \frac{\gamma_{oct}}{a + b \cdot \gamma_{oct}}$$

$$a = \frac{1}{G_i}, \quad b = \frac{R_f}{\tau_{oct,f}}, \quad R_f = \frac{\tau_{oct,f}}{\tau_{oct,ult}}$$

ここで、 G_i は初期接線せん断弾性係数、 $\tau_{oct,f}$ は測定される最大応力、 $\tau_{oct,ult}$ は双曲線モデルでの終局最大応力である。

岩に対する降伏条件式は、普通非線形で表され、HokeとBrown³⁾が示した次式を採用する。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{(m\sigma_o\sigma_3 + s\sigma_o^2)}, \quad (\sigma_1, \sigma_3: \text{最大, 最小主応力})$$

ここに、 σ_o は一軸圧縮強度であり、 s と m は岩の特性に応じて決まる材料定数である。二次元平面ひずみ状態及び、せん断中に体積変化がないという仮定のもとで、釣り合い条件式に応力-ひずみ関係と前述の降伏条件式を適用して解くと、トンネル半径方向応力 σ_r が次式の様に求められる。

$$\sigma_r = P - \frac{1}{2R_f} \sqrt{(m\sigma_o P + s\sigma_o^2)} \cdot \log\left(\frac{A}{dr^2} + 1\right)$$

$$+ \frac{m\sigma_o}{16R_f^2} \left\{ \log\left(\frac{A}{dr^2} + 1\right) \right\}^2,$$

$$d = \frac{\sqrt{6}}{4} \cdot \frac{\tau_{oct,f}}{R_f} \cdot \frac{1}{G_i}$$

ここに、 $\tau_{oct,f}/G_i$ は一定と仮定する。 A はトンネル内面($r = r_i$)でのつりあい条件($\sigma_r = p_i$: 内圧)より決定され、変位 u は $u = A/r$ で与えられる。円周方向応力は、紙面の関係上省略する。

3. 結果及び考察

図-2に、トンネル円周方向応力 σ_θ について、実測値、本非線形結果、及びカスター（Kastner）理論⁴⁾による弾塑性解析の結果を比較して示す。弾塑性解析では、 σ_θ は弾性域から弾塑性境界に近づくにつれて、急勾配で増大するが、ピークに達した後、塑性域で急激に減少している。本解析では、 σ_θ はトンネルに接近するに従って、非常にわずかな応力増加しか示さず、その後減少しており、この傾向は弾塑性解析結果のそれと大きく異なっている。実測土圧は、本解析結果と非常に良く対応しているが、弾塑性解析結果とは大きく異なっている。次に、図-3はトンネル半径方向変位について、実測値、本非線形解析結果及び弾塑性解析結果を比較して示したものである。なお変位は、弾塑性解析ではポアソン比 ν の値によって変化するので、 ν の値を2通り変えており、また弾性係数 E は、一軸時での最大応力の50%における接線係数 E_{50} を用いている。図を見ると、弾塑性解析結果は、変位の最小値を与える $\nu=0.0$ の場合でも、実測値の約5.5倍であり、この解析がいかに現実的でない解を与えているかが理解できる。また、同図中には、 $\nu=0.0$ とし、かつ弾塑性解と同一の E_{50} 値を用いた弾性解も併記しているが、当然のことながら、この結果も実測値より相当大であるのがわかる。一方、本解析結果は、実測結果に良く対応しており、実際の現象をうまく表現できていることが理解できる。

4. 結論

本研究は、非線形応力-ひずみ関係、非線形降伏特性など、軟岩の諸特性を考慮して、等方初期応力下の二次元平面ひずみ円形トンネル解析を理論的に行い、応力、ひずみ、変位の閉じた解を導いた。

また、軟岩地山を想定したトンネル模型実験結果と本非線形解析結果、Kastnerの弾塑性解析結果とを比較し、Kastner解が非現実的な解を与えることのある事、及び本解析結果が軟岩トンネル挙動をよく説明できる事を示した。

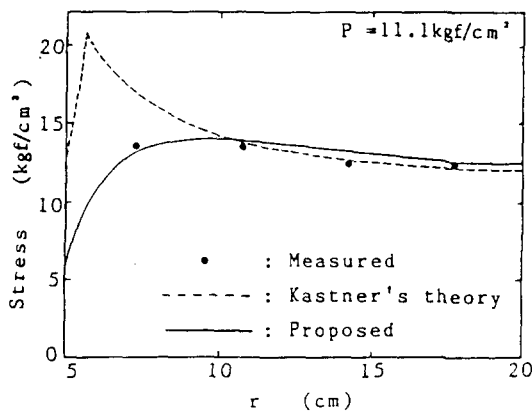


図-2 トンネル円周方向応力

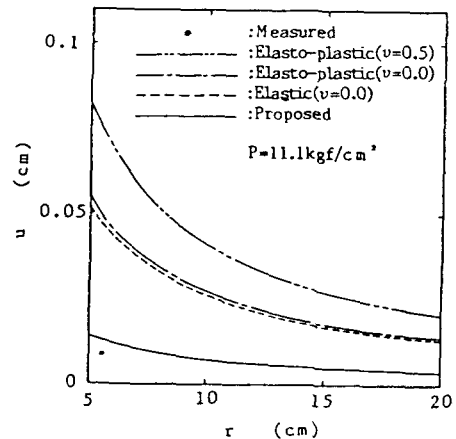


図-3 トンネル半径方向変位

参考文献

- 1) 川上・朝倉：鉄道技術研究所速報、No. A-87-209, pp. 1-29, 1987.
- 2) Kondner, R.L : Hyperbolic stress - strain response : Cohesive soils, J. Soil Mech. Fdns. Div. ASCE, 89, SM1, pp. 115~143, 1963
- 3) Hoek, E. & Brown, E.T. : Underground excavation in rock, The institute of Mining and Metallurgy, 1980.
- 4) H. Kastner (金原 弘 訳) : トンネルの力学, 森北出版, 1976.