

III-B 92 トンネル施工の2次元解析における等価掘削荷重に関する一考察

福井大学大学院 学生員 ○ 持田哲郎
福井大学工学部 正会員 福井卓雄

1 はじめに

本来、トンネル施工過程における挙動を解析するためには、3次元解析が必要であるが、3次元解析は多大な労力を要するため、通常は簡便な2次元解析を行うことが多くなる。

本研究では、覆工の効果をバネとして考えたトンネルの3次元解析を行い、2次元解析における等価掘削荷重の適用性を検討する。

2 トンネル切羽周辺の応力変形場

等価掘削荷重を決定するための準備として、平面ひずみ状態におけるトンネル周辺の応力、変形を3次元の弾性解と比較する。

等方等質弾性体の平面ひずみ状態において、トンネルの断面は円形であるとし、等価掘削荷重の作用した状態を考えることとする。トンネルの半径は a で、等方応力 $-\sigma_0$ の作用している無限領域にトンネルが開削され、等価掘削荷重として $(1-\alpha)\sigma_0$ が内圧として作用しているものとする。ここに α ($0 < \alpha < 1$) は切羽進行パラメータである。

とくに、トンネル表面上では、 $r = a$ において、

$$\sigma_r = -(1-\alpha)\sigma_0$$

$$\sigma_\theta = -(1+\alpha)\sigma_0$$

$$\sigma_z = -2\nu\sigma_0$$

$$u_r = -\frac{\alpha a \sigma_0 (1+\nu)}{E}$$

となる。[1]

また、2次元解と比較するために、3次元状態における全断面掘削の円形トンネルの切羽周辺の応力変形を境界要素法により解析した。(図1)にポアソン比が0.25の場合の境界上の応力、ひずみおよび変位を軸方向の関数としてプロットしたものを示す。[2]

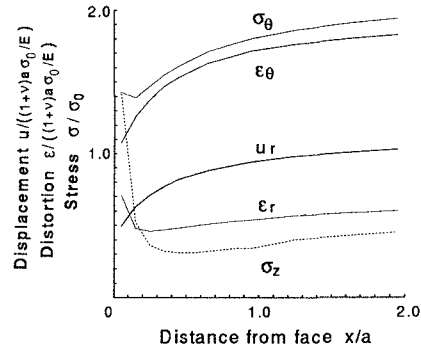


図-1 円形断面トンネルの境界における応力変形分布 ($\nu = 0.25$)

3 等価掘削荷重の選定法

3次元解析の結果において、切羽からの距離 x の関数であるこれらの物理量を用いて $\alpha(x)$ を決定する方法として、適合させたい物理量を選択し、その物理量となるべく一致するように $\alpha(x)$ を決定するという方法を用いる。

決定のための基準となる物理量としては、(1) 周方向応力 σ_θ 、(2) 主応力差 (最大せん断応力) $|\sigma_r - \sigma_\theta|$ 、(3) 半径方向変位 u_r 、(4) 周方向ひずみ ε_θ の4つを選んだ。これらは解析において、それぞれ異なる適用性を持っていると考えられる。

これらの4つの基準について、それぞれ、

$$\sigma_{2\theta}(\alpha) = \sigma_{3\theta}(x)$$

$$|\sigma_{2r}(\alpha) - \sigma_{2\theta}(\alpha)| = |\sigma_{3r}(x)|$$

$$u_{2r}(\alpha) = u_{3r}(x)$$

$$\varepsilon_{2\theta}(\alpha) = \varepsilon_{3\theta}(x)$$

として、 $\alpha(x)$ の値を決定する。ポアソン比が0.25のときの $\alpha(x)$ の関数形を(図2)にグラフとして表示した。

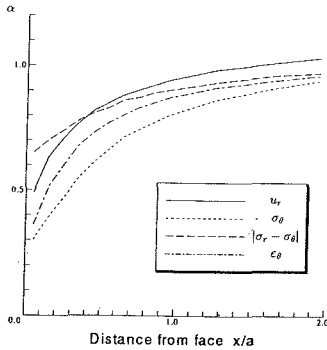


図-2 $\alpha(x)$ の関数形 ($\nu = 0.25$)

4 覆工の施されたトンネルの3次元解析と検討

2次元解析の意義を考察するために、覆工の施されたトンネルの3次元解析を試みる。考え方は、円形トンネルの内壁に細いリング状の内圧がかかったとし、このときの覆工のトンネル断面への影響をバネに置き換えることとする。覆工の効果をバネとして考えると、トンネル壁面と覆工との相互作用は、トンネル壁面への内圧と壁面の半径方向変位とを介して行われる。本研究では、内圧を未知量とし、トンネル壁面と覆工との間の連続条件から内圧を決定する。式に表すと、

$$u_1 + \frac{p(x)}{k} = u_0(x) + \sum_i A_i(x)p_i \quad (2) \quad \text{参考文献}$$

となる。ここに、 u_1 は切羽からの距離が x_1 の位置の変位、 u_0 は地山応力による変位、 $p(x)$ は内圧、 k はバネ定数、 $A_i(x)$ は基本特異解の近似解を表す。ここで p_i が求まれば変位及び応力を求めることが出来る。

この方法を用いて、ポアソン比が0.25と0.4のときの、 $E_l/E = 20, 100, 500$ とした場合について、それぞれ覆工施工の位置を $x_1/a = 0.1, 0.2, 0.4$ と場合分けし解析を行った。 E は地山のヤング係数、また E_l は覆工のヤング係数である。(図3)にポアソン比が0.25のときの $E_l/E = 100$ の場合の三ケースを示す。

これらの解析結果より、覆工の硬さのもたらす影響と覆工の施工位置の違いによるトンネル壁面の挙動への影響を読み取ることが出来る。覆工の硬さは壁面の変形の拘束に最も効果的であり、最も硬い $E_l/E = 500$ の場合では、覆工施工後の変形はほとんど生じていない。応力については、周方向応力がかなり小さくなっている。一方、半径方向の応力は、拘束のために逆に大きくなっており、覆工部分に大きな荷重が作用している。

覆工の施工位置については、覆工の施工位置が切羽に近いほど変形の拘束が大きくなる。したがって、覆工の硬さの効果の場合と同様に、周方向応力、半径方向応力の挙動についても同様のことがいえる。

このようなことから、覆工が硬い場合には、覆工が施工後の変形をほとんど拘束してしまうことになるので、軟らかい地山、つまり相対的に覆工が硬い場合には、変形を基準とした等価掘削荷重を採用することが妥当であると考えられる。

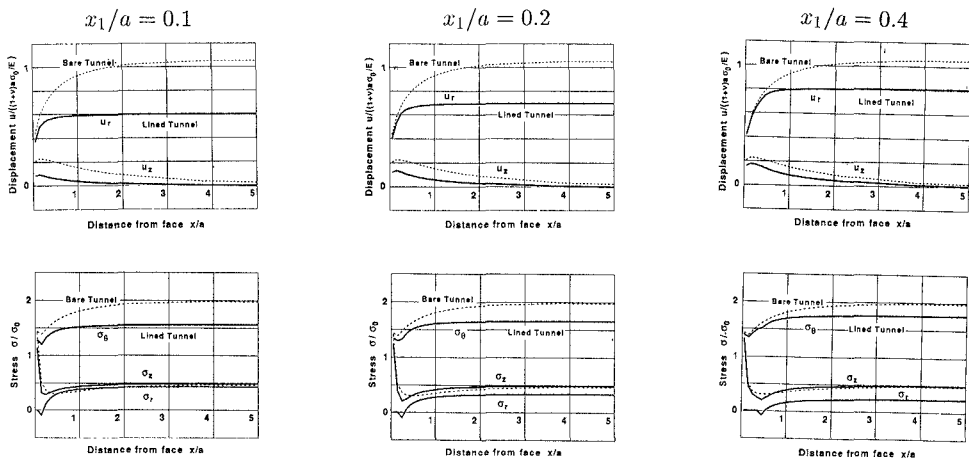


図-3 $E_l/E = 100$ の場合の変位及び応力 ($\nu = 0.25$)

- [1] Y.C. ファン (大橋義夫他訳)：固体の力学／理論、培風館 (1970)。
- [2] 円羽義次、小林昭一、福井卓雄：積分方程式による空洞周辺の三次元応力解析／土木学会論文報告集第266号 (1977.10)