

鴻池組 技術研究所 正員 小松賢一
福井大学工学部 正員 福井卓雄

1. まえがき

トンネル切羽周辺の3次元応力・変形状態を3次元有限要素法によつて解析することは、原理的に困難な問題ではないが要求される計算量が膨大であるため、実用的な解を得るには現用の大型計算機でも十分でない場合が多い。しかしながら解析対象を中心軸を共有する軸対称弾性地盤内の円形断面トンネルに限れば、FEM非軸対称荷重問題が適用でき、2次元問題の拡張として効率良く3次元解析を行うことが可能である。とくに一樣な水平地盤内の水平トンネルの場合には、掘削相当外力のフーリエ展開が $n=0\sim 3$ の4項で整理され、しかも対称荷重状態であるため問題は簡単になる。すなわち、任意の軸断面での3次元応力・変形状態は4つの2次元解析の重ね合わせとして評価できる。本報告では、そのようなトンネルの切羽周辺の3次元応力・変形状態を解析した例を示す。

2. 一樣な水平地盤内の水平トンネルの解放応力

K_0 状態の地盤の、トンネル掘削予定面上の任意の一点での3主応力は次式で与えられる。ただし、円筒座標系の z 軸の方向をトンネル中心軸の切羽進行の逆方向と一致させ、 r をトンネル中心軸からの距離、 θ を鉛直上向き方向よりの角度とする。また、応力の符号については引張応力を正と定義する。

$$\left. \begin{aligned} \text{最大主応力 } \sigma_1 &= \sigma_2 = -K_0 \delta (H - r \cos \theta) \\ \text{最小主応力 } \sigma_3 &= -\delta (H - r \cos \theta) \end{aligned} \right\} \text{--- ①}$$

ここに、 K_0 : 静止土圧係数、 δ : 地盤材料の単位体積重量、 H : トンネル中心軸より地表面までの距離

トンネル半径を R とすると、円周面で解放される応力は、 $r=R$ より、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \sigma_3 \cos^2 \theta + \sigma_1 \sin^2 \theta \\ &= -\frac{(1+K_0)\delta H}{2} + \frac{(3+K_0)\delta R}{4} \cos \theta \\ &\quad - \frac{(1-K_0)\delta H}{2} \cos 2\theta + \frac{(1-K_0)\delta R}{4} \cos 3\theta \\ \tau_{\theta r} &= (\sigma_1 - \sigma_3) \sin \theta \cos \theta \\ &= -\frac{(1-K_0)\delta R}{4} \sin \theta + \frac{(1-K_0)\delta H}{2} \sin 2\theta \\ &\quad - \frac{(1-K_0)\delta R}{4} \sin 3\theta \\ \tau_{zr} &= 0 \end{aligned} \right\} \text{--- ②}$$

切羽面で解放される応力は、 $z = \text{const.}$ より、

$$\left. \begin{aligned} \sigma_z &= -K_0 \delta H + K_0 \delta r \cos \theta \\ \tau_{\theta z} &= \tau_{rz} = 0 \end{aligned} \right\} \text{--- ③}$$

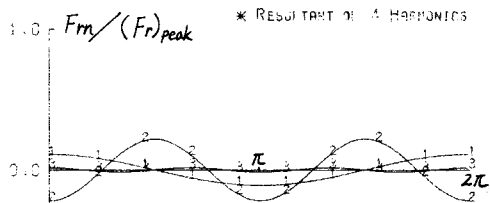


図-1 F_r とその調和成分 (トンネル円周面)

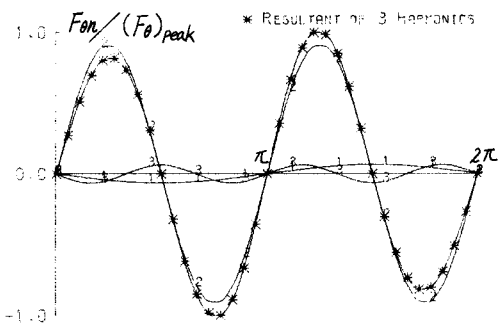


図-2 F_θ とその調和成分 (トンネル円周面)

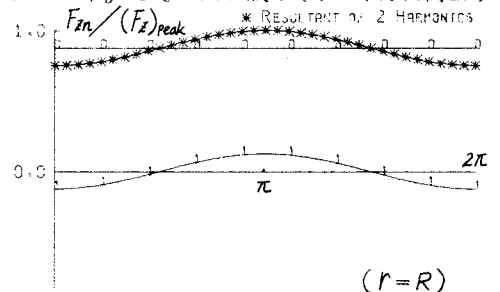


図-3 F_z とその調和成分 (トンネル切羽面)

3. 解析条件

トンネルは、解析領域の地盤とその中心軸を共有し、 $Z = 10.0\text{ m}$ に Z 軸に直交する閉口端（切羽面）があり、閉口端より 10.0 m の距離に開口端があるような、半径 2.5 m の素掘りトンネルを想定する。

トンネル周辺の地盤は、一様な水平地盤中にトンネルと中心軸を共有する、半径 5.5 m 、解析領域の Z 軸方向の全延長にわたる地盤改良を行う場合を想定し、非改良部分では $E = 50\text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.333$, 改良部分では $E = 1,000\text{ kgf/cm}^2$, $\nu = 0.333$ とともに等方等質な線形弾性体と仮定する。拘束条件としては、解析領域外周で完全固定、切羽前方の端面で完全固定、切羽後方の端面で 軸方向変位のみ固定とし、中心軸は非拘束とする。

$$K_0 = 0.5, \quad r = 0.0018 \text{ kg/cm}^3, \quad H = 17.5 \text{ m}, \quad R = 2.5 \text{ m} \text{ のとき,}$$

②, ③式より、トンネル自由面単位面積当たりの掘削相当外力の分布形は次式で与えられる。

円周面では、（図-1, 2参照）

$$\left. \begin{aligned} F_r &= -2.363 + 0.394 \cos \theta \\ &\quad - 0.788 \cos 2\theta + 0.056 \cos 3\theta \text{ kgf/cm}^2 \\ F_\theta &= -0.056 \sin \theta + 0.788 \sin 2\theta \\ &\quad - 0.056 \sin 3\theta \text{ kgf/cm}^2 \end{aligned} \right\} \textcircled{4}$$

切羽面では、（図-3参照）

$$F_x = 1.575 - 0.225 \frac{r}{R} \cos \theta \text{ kgf/cm}^2 \quad \text{--- (5)}$$

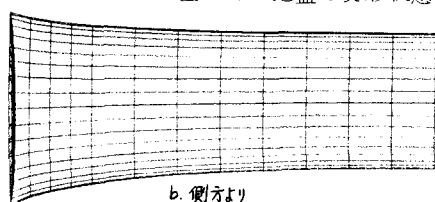
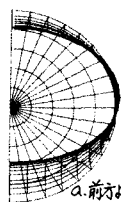


図-5 トンネル内空の変形状態

4. 解析結果

解析領域右半分の変形状態を図-4に、トンネル内空の変形状態を図-5に示す。切羽近傍では切羽の半径方向の変形拘束効果が顕著であるが、切羽からの距離の増大に伴ってそれが徐々に消失し、平面ひずみ状態の変形へ移行していく過程が明らかである。なお、最大の半径方向相対変位は $\theta = 0, \pi$ の断面で生じ、切羽位置で -1.17 cm 、距離 $4R$ の位置で -4.56 cm である。

図-6に、地盤改良部分のうち、せん断破壊に対する危険度 $R_{sf} > 1.0$ となる要素の3主応力を示す。図より、せん断破壊を生じる危険性があるのは $\theta = \frac{\pi}{3} \sim \frac{2\pi}{3}$ のトンネル円周部分であり、もつとも危険なのは $\theta = \frac{\pi}{2}$ の、切羽からの距離が $3R \sim 4R$ の位置である

こと、切羽近傍はほぼ安定である (R_{sf} の最大値は $\theta = \pi$ の切羽隅角部で 0.9) ことなどがわかる。したがってトンネル全体の安定を保つためには、地盤改良土の強度を向上させる ($C > (R_{sf})_{\max.} \times 3.0 = 4.2 \text{ kgf/cm}^2$) か、あるいは切羽の進行が $\frac{R}{2}$ 以内 ($\theta = \frac{\pi}{2}$ では切羽からの距離 $\frac{R}{2}$ で $R_{sf} > 1.0$ となる) のうちにトンネル円周面を補強する (吹付けコンクリート、ロックボルトなど) ことが必要になるものと考えられる。

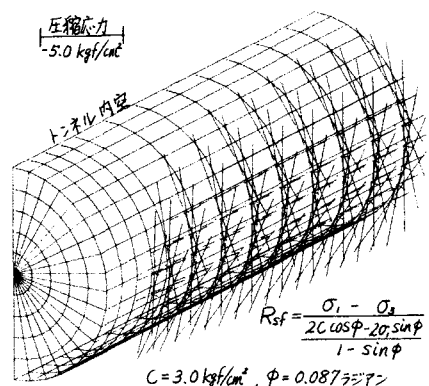


図-6 破壊を生じる要素の3主応力

5. あとがき

FEM非軸対称荷重問題のトンネルの挙動解析への適用は、i)円形断面トンネルであること、ii)解析領域を軸対称弾性体と見なし得ること、iii)拘束条件上の制約から解析領域外周を固定する必要があるため、地表面沈下についての議論が困難なこと、などの適用限界があるが、切羽を含めたトンネル全体の3次元的な挙動の定性的傾向を把握する上では、解析法の簡便さや計算時間の点で有利と考えられる。

参考文献 E.L.Wilson, "Structural Analysis of Axisymmetric Solids," JAI AA, Vol. 3, No. 12, pp2269~2274, 1965

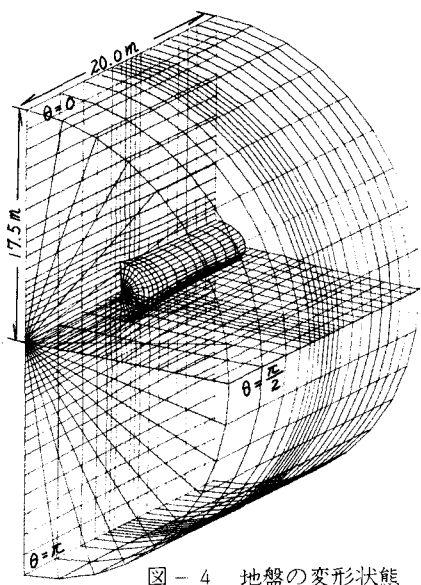


図 4 地盤の変形状態