

Ⅲ-590

全面定着型ロックボルトで支保された地山の応力と変形

神戸大学 正会員 櫻井 春輔
 ○三井建設 正会員 山田 文孝
 " 正会員 山地 宏志

1. はじめに

現場計測から得られたロックボルト軸力の大きさや分布は、トンネルの安定性を論ずる上で欠かすことのできない情報だが、地山応力や変形との関係が明瞭でないため、得られた計測結果が十分施工に反映されていないように思われる。このような問題に関して数値解析手法は有効であると思われるが、現場で計測結果をただちに評価するためには理論解を用いた方法が有用であろう。本文では、全面定着型ロックボルトで支保された円形トンネルの理論解を導き、弱干の数値シミュレーションを実施した結果を報告する。

2. ロックボルト作用効果のモデル化

全面接着型ロックボルトの微小要素における力の釣り合いを図1に示す。この図に従えばロックボルト微小要素に軸力 P により軸応力 σ_a が生じ、これに応じてロックボルト表面にせん断応力 τ_s が作用する。地山では τ_s と同じ大きさで逆方向のせん断抵抗 τ を受ける。この関係はロックボルトー地山間の付着特性を考慮して次のように表すことができる。

$$\tau = \alpha \frac{dp}{dr} \quad (0 \leq \alpha \leq 1) \quad (1)$$

ここで、 α は付着特性を表すパラメータである。このせん断抵抗 τ がロックボルトが打設された領域に一樣に分布するものとして、ロックボルトの作用効果をモデル化する。すなわち、ロックボルトの作用効果は次式で示すせん断体積力 τ_r として取り扱われる。

$$\tau_r = \frac{\alpha}{t} \sum_{i=1}^n \frac{dP_i}{dr} \quad (2)$$

ここで、 t はトンネル軸方向のロックボルト打設間隔を、また n は断面当たりのロックボルト打設本数を表す。

3. 全面接着型ロックボルトで支保された円形トンネルの解

図2に全面接着型ロックボルトで支保された円形トンネル周辺地山の力の釣り合いを模式的に示す。今、簡単の為に式(2)の P_i を P :Constantと仮定すると、ロックボルトが打設された領域の力の釣り合い条件が次式のように示される。

$$\frac{d^2 U_r}{dr^2} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 2\tau^* \quad \text{ここで} \quad \tau^* = \frac{\tau_r}{2U} \quad (3)$$

式(3)にフックの法則、円柱座標系の変位-ひずみ関係を用いて書き直せば、次のような非斉次線型微分方程式を得る。

$$\frac{d^2 U_r}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dU_r}{dr} - \frac{U_r}{r^2} = \frac{2(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)E} \tau^* \quad (4)$$

ここで、 U_r は地山の半径方向変位、また E 及び ν は各々地山の弾性係数及びポアソン比である。

一方、ロックボルトが打設されない領域($r \geq \eta$)の応力解と変位解は、半径 η のトンネルを掘削したことによる解と、その孔縁に $\sigma_r = \sigma^*$ なる応力が作用する二次元問題の解との和で与えられる。すなわち、

$$\sigma_r = P_0 \left(1 - \frac{\eta^2}{r^2} \right) + \sigma^* \frac{\eta^2}{r^2} \quad U_r = \frac{1+\nu}{E} \left\{ (1-\nu)P_0 + (P_0 - \sigma^*) \frac{\eta^2}{r^2} \right\} r \quad (5)$$

今、式(5)をトンネル壁面($r = \eta$)における応力の境界条件 $\sigma_r|_{r=\eta} = 0$ を用いて解き、ロックボルトの打設境界($r = \eta$)における連続条件を用い未定数 σ^* などを定めると次のような解が得られる。

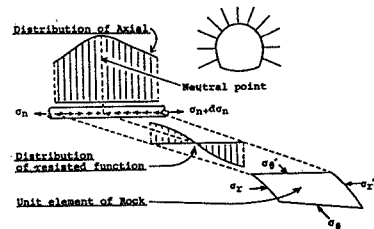


図1 ロックボルトに作用する摩擦抵抗力

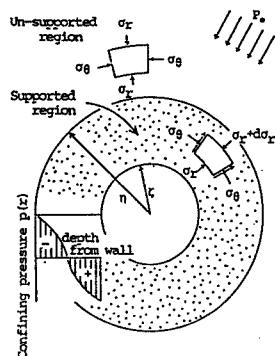


図2 ロックボルトで支保された円形トンネル

ロックボルトが打設された領域（ $\zeta \leq r < \eta$ ）

$$\begin{aligned}\sigma_r &= \left(P_0 - \frac{1}{1-\nu} \int_{\zeta}^{\eta} \tau^* d\xi \right) \left(1 - \frac{\zeta^2}{r^2} \right) + \frac{1}{1-\nu} \left\{ \int_{\zeta}^r \tau^* d\xi + (1-2\nu) \int_{\zeta}^r \frac{\xi^2}{\zeta^2} \tau^* d\xi \right\} \\ \sigma_{\theta} &= \left(P_0 - \frac{1}{1-\nu} \int_{\zeta}^{\eta} \tau^* d\xi \right) \left(1 + \frac{\zeta^2}{r^2} \right) + \frac{1}{1-\nu} \left\{ \int_{\zeta}^r \tau^* d\xi - (1-2\nu) \int_{\zeta}^r \frac{\xi^2}{\zeta^2} \tau^* d\xi \right\} \\ U_r &= \frac{1+\nu}{E} \left\{ P_0 - \frac{1}{1-\nu} \int_{\zeta}^{\eta} \tau^* d\xi - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \int_{\zeta}^r \frac{\xi^2}{\zeta^2} \tau^* d\xi \right\} \frac{\zeta^2}{r}\end{aligned} \quad (6)$$

ロックボルトが打設されない領域（ $r \geq \eta$ ）

$$\begin{aligned}\sigma_r &= P_0 \left(1 - \frac{\zeta^2}{r^2} \right) + \frac{1}{1-\nu} \left\{ \int_{\zeta}^{\eta} \tau^* d\xi + (1-2\nu) \int_{\zeta}^{\eta} \frac{\xi^2}{\zeta^2} \tau^* d\xi \right\} \\ \sigma_{\theta} &= P_0 \left(1 + \frac{\zeta^2}{r^2} \right) + \frac{1}{1-\nu} \left\{ \int_{\zeta}^{\eta} \tau^* d\xi - (1-2\nu) \int_{\zeta}^{\eta} \frac{\xi^2}{\zeta^2} \tau^* d\xi \right\} \\ U_r &= \frac{1+\nu}{E} \left\{ P_0 - \frac{1}{1-\nu} \int_{\zeta}^{\eta} \tau^* d\xi - \frac{1-2\nu}{1-\nu} \int_{\zeta}^{\eta} \frac{\xi^2}{\zeta^2} \tau^* d\xi \right\} \frac{\zeta^2}{r}\end{aligned} \quad (7)$$

4. 数値シミュレーション

式(6), (7)は静水圧の初期応力状態下にある地山に半径 ζ の円形トンネルを掘削した解と、孔を有する無限弾性体の孔壁から $(\eta - \zeta)$ の範囲にせん断体積力を作用させた解の和となっている。ここでは、 $p_0=0$ としてトンネル掘削による影響を無視し、ロックボルトによる地山のせん断抵抗について考察する為の数値シミュレーションを行った。シミュレーションにおいてはロックボルトの軸力分布を二次曲線で近似し、次式に示す τ^* を用いた。

$$\tau^* = \frac{n P_m}{(\eta - \zeta)^2 \pi t} \left(\frac{\zeta + \eta}{r} - 2 \right) \quad (13)$$

この数値シミュレーションに用いた緒元を表1に示す。

図3は最大ボルト軸力を $P_m=10\text{ton}$ として、ロックボルト長を100, 200, 300, 400, 500cmとした場合の、また図4はボルト長を500cmとして、最大ボルト軸力を $P_m=5, 10, 15, 20\text{ton}$ とした場合の地山応力及び地山変位の変化を示したものである。尚、図3及び図4中の応力分布図で実線は半径方向応力を、また点線は円周方向応力を示す。

ここに示した応力、変位分布は定性的には納得できるが、用いたボルト長や最大ボルト軸力が現実的な値であるにもかかわらず、拘束される地山変位が0.01~0.03cmと非常に小さいことを考えると、ロックボルトの作用効果を単純な弾性論で考えることは難しいものと思われる。

5. おわりに

今後、ロックボルトの作用効果のモデル化を改善するとともに、地山を弾・塑性体とするなどして解を向上させて行く方針である。

表1 数値シミュレーション諸元

トンネル半径	ζ	500 cm
ロックボルト長	$\eta - \zeta$	100, 200, 300, 400, 500 cm
軸方向ボルト間隔	t	100 cm
ボルト本数	n	12 本
地山の弾性係数	E	5,000 kgf/cm ²
地山のポアソン比	ν	0.3
最大ボルト軸力	P_m	5, 10, 15, 20 ton

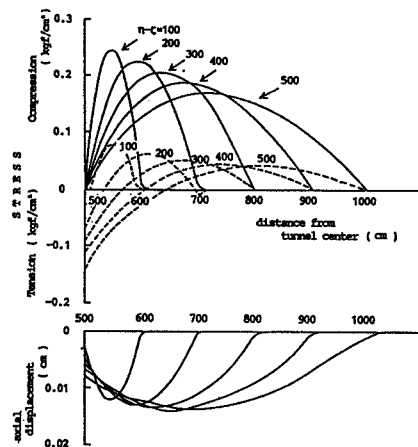


図3 打設長による地山拘束効果の差異

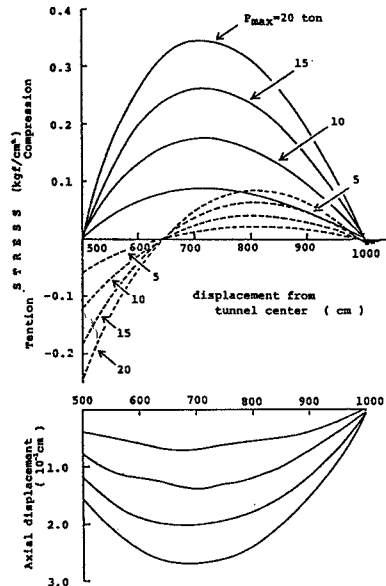


図4 軸力による地山拘束効果の差異