

神戸大学 正員 桜井春輔

1. はしがき

諸外国におけるトンネル建設工事においては、工事の経済性、安全性さうには施工速度を高めるためにロックボルトが盛に使用されている。しかし、岩盤力学を基にしたロックボルトの施工効果あるいは作用機構の理論的研究には未だ多くの問題を残している。したがって、ここではその作用機構、特にボルトのゆるみについて理論的に考察を行なうことにする。

2. 解析モデルおよび仮定

トンネル内壁周辺には、ロックボルトにより図-1に示すような圧縮帯が生ずるものとする。Langの光弾性実験によれば、この圧縮帯はボルト長がその間隔の2倍以上あれば、連続した均一なものとなることがわかる。わが国のトンネル標準示方書も、この事実を基にしてボルトの長さと同隔が規定されている。したがって、本研究における解析モデルも、このような比較的均一な圧縮帯の存在する場合を想定して定める。まず、地山を線型粘弾性体とし、その中に円形トンネルを考える。ロックボルトからの力は分布荷重として取扱う。すなわち、トンネル内壁の分布荷重 p_c およびボルト定着部の分布荷重 p_c^* はそれぞれつぎのように表わされる。

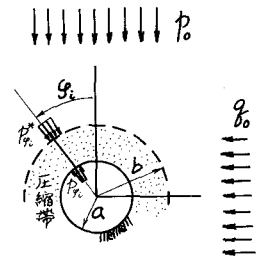
$$p_c = P_c n / 2\pi a t \quad , \quad p_c^* = P_c^* n / 2\pi b t \quad (1)$$


図-1

ここで、 P_c は g_c の位置におけるボルトに作用する力、 n は円周方向の本数、 t はトンネル軸方向のボルト間隔を表わす。なお、ロックボルトの初期応力は円周方向に一様であると仮定する。一般に、ロックボルトの応力は時間とともに変化するが、さらに、地山の初期応力が二軸状態であれば、円周方向にも変化することになる。しかし、その円周方向の変化分の地山変位におよぼす影響は非常に小さいので解析においてはこれを無視する。なお、解析は二次元平面応み状態において行なう。

3. ゆるみの解析

ロックボルトに作用する力 P_c の経時的变化は次式によって与えられる。

$$P_c(t) = P_c(0) + A_0 E_s \{ \delta_a(t) - \delta_b(t) \} / l \quad (2)$$

ここで、 $P_c(0)$ は初期締めつけ力、 $\delta_a(t)$ 、 $\delta_b(t)$ はそれぞれトンネル内壁および地山内部の定着部におけるボルトの変位、 l および A_0 はボルトの長さおよび断面積、 E_s は鋼のヤング係数を表わす。 $\delta_a(t)$ および $\delta_b(t)$ はそれぞれの位置における地山の変位 $\delta_a^*(t)$ 、 $\delta_b^*(t)$ とロックボルトのすべり量 δ_R (地山内の定着部のすべりと内壁のベアリングプレートにおける塑性変形からなる) の和として求まる。すなわち、 $\delta_a(t) - \delta_b(t) = \delta_a^*(t) - \delta_b^*(t) - \delta_R$ となる。ボルトの変位 $\delta_a(t)$ 、 $\delta_b(t)$ は粘弾性解析によって計算できる。なお、 g_c 点の変位の計算においては、ロックボルトの作用力の円周方向の変化分による影響は小さいとして、近似的に p_c および p_c^* が円周方向に一様に作用するとして計算する。また、 δ_R は定着部のすべりがほとんど認められないという

実験結果から、そのほとんどはベアリングプレートにおける地山の塑性変形に起因すると考えられる。結局 (2) 式はボルテラ型非線形積分方程式となり、その解はボルトに作用する力の経時の変化を与える。いま、 $\delta R = 0$ とすれば、その解はつぎようになる。

$$\frac{P_R(t)}{P_0} = \frac{1}{1-\kappa^*c} \left(\frac{P_R(0)}{P_0} + m \right) - \frac{1}{1-\kappa^*c} \left(\frac{P_R(0)}{P_0} \kappa^*c + m \right) e^{-(1-\kappa^*c)t/c} \quad (3)$$

ここで、 $\kappa^* = \frac{\lambda/2G^*}{c(1-\lambda/2G^*)}$, $m = \frac{E_s}{2G^*} \frac{\beta e^{-t/c}}{(1-\lambda/2G^*)} \left(\frac{a}{b-a} \right) \{ (U_5 - U_1) + (U_4 - U_2)(\theta_0/P_0) \}$, $\beta = A_s n/2mat$

地山のフリーボディ数： $\frac{1}{2G} + \frac{1}{2G^*}(1 - e^{-t/c})$, t : トンネル掘削後ボルトを施すまでの時間。

4. 数値計算結果とその考察

(3) 式において、 $t \rightarrow \infty$ とすれば、 P_R の終局値が求まる。いま、 $\theta_0/P_0 = 1$ において、 $P_R(t)$ を種々のデータに対して計算した結果の一例を図-2 に示す。この図から、ロックボルトに作用する力は初期締めつけ力より増加する場合と減少する場合があることがわかる。この場合、ボルトの施工時期が大きな要素である。したがって、ボルトがゆるまない最適施工時期が存在する。図-3 にその結果を示す。つぎに、初期締めつけ荷重の経時の変化の実測例を図-4 に示す^{*)}。この図から、B、C 両地質とも約 2 日間荷重は減少する。しかし、その後 B 地質では増加する傾向がみえる。最初の損失はベアリングプレートにおける地山の塑性変形の影響であり、2 日後からは地山の粘弾性的性質によるものであろう。本研究の結果は、この実測結果を定性的にではあるが説明できるものと思う。つぎに、地山の初期応力が二軸状態の場合の結果を図-5 に示す。この図から $\theta_0/P_0 < 0.4$ の場合、 $\theta_0 = \pi/2$ においてボルトは常にゆるむことが明らかである。なお、初期応力 $P_0 = \theta_0 = 10 \text{ kg/cm}^2$ の地山内トンネル(半径 5m)で、ボルト間隔 1m、ボルト長 2.5m、径 $\phi 25 \text{ mm}$ 、初期締めつけ力 10^2 とすれば、 $P_R(0)/P_0 = 0.1$, $a/b = 0.67$, $\beta = 0.0005$ である。

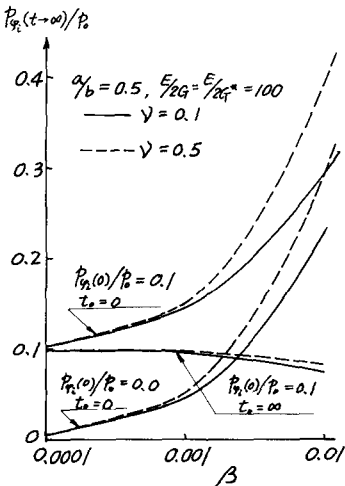


図-2

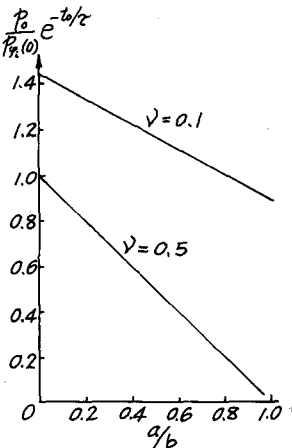


図-3

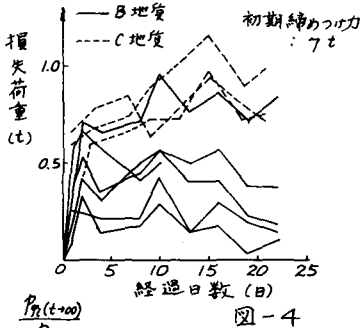


図-4

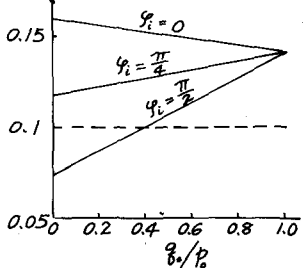


図-5

*) 高速道路調査会、高速道路と自動車、vol.13, no.11, 1970, pp76~81