

III-260

軟岩におけるロックボルトの簡易設計法

東京都立大学 正員 今田 徹
 東京都立大学 正員 山崎 良一

1、はじめに

硬岩におけるロックボルトの作用は、主として節理などの力学的不連続面における岩塊の相互移動を防止して岩体としての連続性を保つことにより、岩体を構成する岩石の強度を有効に利用してトンネルの安定を得るものであると考えることが出来る。しかし、軟岩の場合のようにトンネル周辺に生ずる応力が岩石の強度を超える場合のロックボルトの作用は、ロックボルトと地山間の相対移動によって生ずる拘束応力が地山に作用し、地山の耐荷能力を大きくしてトンネルを安定させるものであるとみなされる。粒状体を用いた一連のロックボルトの実験の結果から、ロックボルトで補強された地山は疑似弾性リングとして作用することが明らかになってきたので、この結果を用いて、簡略なモデル化を行いロックボルトの効果を評価し、ロックボルトの設計の目安を得る方法を検討した。

2、ロックボルトで補強された地山のモデル化

ロックボルトの作用は、地山とロックボルトの弾性定数の違いによる変位差によって生ずる力が地山を拘束し、その強度を増加させることにあるものと考えることが出来る。従って、地山が弾性状態にある場合にも作用するが、その作用が発揮されるのは、地山が降伏し変位が著しく大きくなる場合である。地山が弾性状態に留まる場合は支保工を必要としない状態であり設計上問題にする必要は少ない。トンネルの安定が問題になるのはトンネルの周辺に塑性領域が形成され、塑性化した地山が安定を保ち得るかかどうかという場合であるので、ここではこの状態に対してモデル化を行うことにする。すなわち、トンネル安定上の極限的な状態を想定して、トンネルの周辺には塑性領域が形成され、ロックボルトは塑性領域にその全長が含まれるものとする。モデル化の対象は円形のトンネルに等間隔でロックボルトを設置したものとし、地山はクーロンの降伏条件に従うものとする。図-1はロックボルト1本を含む地山を切り出したものである。ロックボルトと地山の間の力のやり取りは、1) ロックボルトの掘削面位置における軸力は肌落ち防止工を介して、一様に分布する支保力として地山に与えられる。2) このロックボルトの軸力は地山によって保持されるが、保持力は円周方向の応力によって拘束されるものとし、その最大値は円周方向応力に地山とロックボルト間の摩擦係数を掛けたものとする。図-1のdrのスリットのロックボルト方向の釣合を考えると、

$$2\sigma_r r \sin(\theta_b/2) - 2(\sigma_r + d\sigma_r)(r+dr) \sin(\theta_b/2) - \alpha L_b dr \mu_b \sigma_t + 2\sigma_t dr \sin(\theta_b/2) = 0 \quad (1)$$

がえられる。ここで、 L_b はロックボルトの周辺長、 μ_b はロックボルトと地山との間の摩擦係数、 α はロックボルトの働きの程度を示す定数である。また、地山の降伏条件から $\sigma_t = \xi \sigma_r$ である。 ξ は $\xi = (1 + \sin \phi)(1 - \sin \phi)$ で与えられ、 ϕ は地山の内部摩擦角である。 L_b はロックボルトそのものの径に対するものをとるよりもむしろ定着材を含めた径に対する周辺長をとるのが適当である。 α は極限的な釣合状態にあるとき1であり、1以下の時はロックボルトで補強された塑性リングがロックボルトの保持力に対して余裕を持っていることを示すと考えることが出来る。外周部の半径方向応力 P_o を境界条件にして解くと、

$$P_b = P_o (Ra / (Ra + L))^k \quad (2)$$

が得られる。 P_b はロックボルトの軸力によって掘削面に与えられる支保力、 L はロックボルトの長さ、また、 $k = \xi(1 - \alpha L_b \mu_b / (2 \sin(\theta_b/2))) - 1$ である。

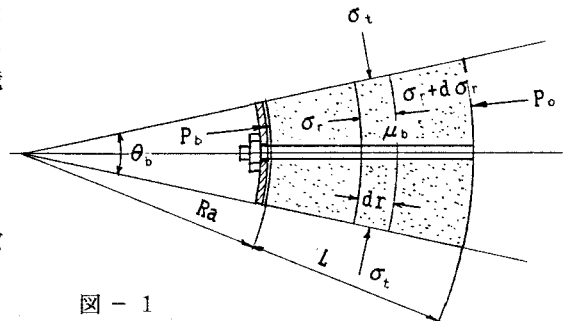


図-1

一方ロックボルトの掘削面位置における軸力 W_b はロックボルト全長に亘って保持力を積分すれば求まるから、

$$W_b = \int_{R_a}^{R_a+L} \alpha L_b \mu_b \sigma_t dr = \alpha L_b \mu_b \xi P_b ((R_a+L)^{k+1} - R_a^{k+1}) / ((k+1)R_a^k) \quad (3)$$

が得られる。 $\alpha=1$ として W_b を求めるとロックボルトが最大限働く状態での軸力が得られることになる。この軸力をロックボルト1本が負担する面積で割るとロックボルトが負担することが出来る平均の最大支保力としての P_{br} が求まる。(2)式から求まる P_b と P_{br} を比較し P_b の方が大きい場合はリングを安定させるに必要な支保力の方が地山のロックボルト保持力を上回ることになるので、リングは安定しない。 P_b が P_{br} より小さい場合はリングの安定が得られることになるが、実際の状態では P_b と P_{br} が等しくなっているはずである。この状態を得るためには α を変化させて、 P_b と P_{br} が等しくなるようにする。 α が1より小さいときはロックボルトの引き抜き力を全部使わないでもリングが安定するような条件になっていることを示すことになる。(2)式からわかるように P_b の値は P_o と比例関係にあり、外力と掘削面におけるロックボルトの軸力とが比例関係にあるという実験の結果と整合している。そしてこの比例定数はロックボルトの配置と長さ、地山の特性、ロックボルトと地山との間の摩擦係数によって決まる。また、 W_b は P_b に比例しているのでロックボルトで補強されたリングが安定するかどうかは、リングに作用する外力 P_o によらず、ロックボルトの幾何学的な条件およびロックボルトと地山との間の特性を含めた地山の条件が与えられれば決定されることになる。

3、試算

図-2はトンネルの径が10m、地山の内部摩擦角およびロックボルトと地山との摩擦角 30° 、ロックボルトの径25mm、ロックボルトの見かけの径を50mmとして、 α とロックボルトとの長さとの関係を示したものである。ロックボルトのトンネル軸方向の間隔は1mとし、周方向の間隔を0.5から1.5mまで変化させている。 α が1の時リングが形成される限界であるから、安定のためには周方向のロックボルトの間隔が0.5mのとき2.1m、0.8mのとき2.7m、1mのとき3.1m、1.2mのとき3.4m、1.5mのとき3.8m以上のロックボルト長をそれぞれ必要とすることを示している。ロックボルトが長くなると α の値は小さくなり、リングの安定に余裕が出てくるが、長さが長くなると勾配は小さくなり必要以上に長くすることはないことを示している。また、地山の内部摩擦角およびロックボルトと地山との摩擦角が等しいものとして、摩擦角を変えてロックボルトの長さ2、3、4mの場合について α を求めると図-3のようになる。リングが形成されるためには長さ4mのとき 27° 、3mのとき 31° 、2mのとき 36° 以上の摩擦角をそれぞれ必要とする。

4、まとめ

トンネル周辺にロックボルトで補強された塑性のリングが形成される場合、そのリングが安定を保つための条件は、地山の特性とロックボルトの配置のみによって決定される。試算によると、本モデル化によって求められる配置は実際に用いられている範囲であることが示された。しかし、ここで取り扱ったモデル化では、肌落ち防止工が完全に機能することを前提としており、また、地山とロックボルト間の粘着力を無視しているため、ロックボルトの軸力の分布は実際に測定で得られるものとは異なっている。これらの点については今後さらに検討が必要である。

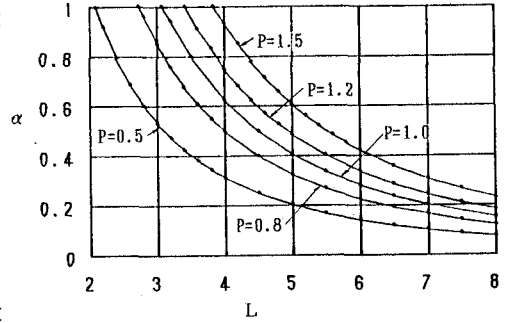


図-2

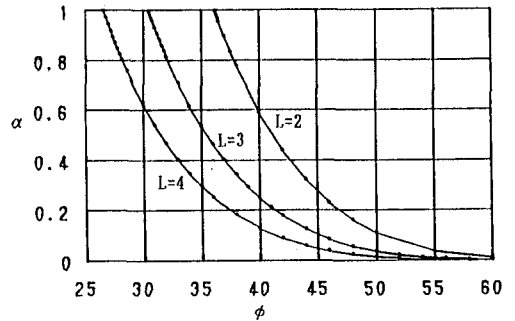


図-3