

ロックボルトとライニングの作用効果の理論的評価

長崎大学工学部 正会員 蔣 宇静 長崎大学工学部 正会員 棚橋由彦
長崎大学大学院 学生会員 元尾秀行 長崎大学大学院 学生会員 竹下揚子

1. はじめに

NATM工法では、ロックボルトとライニングが主な支保工であり、トンネル全体の安定性はロックボルト長や打設密度・ライニング厚に大きく依存する。しかしながら、それらの作用効果については、定量的に解明されておらず、多くの施工実績に基づいて支保設計を行なわざるを得ないのが現状である。本研究では、ロックボルトとライニングの力学的作用効果を明らかにするために、地山のひずみ軟化挙動とダイレタンシー挙動モデルにボルトとライニングを取り入れて、ボルト長や打設密度・ライニング厚による内空変位や塑性領域の抑制とトンネル安定性向上の効果について理論的考察を行い、支保工の合理的設計法を検討する。

2. ロックボルト・ライニングと地山の作用機構の理論解析法

2.1 基本方程式

地山がひずみ軟化とダイレーション挙動を示すことを考え、図 - 1 のような解析モデルを示す。これには、一本のロックボルトが受け持つ半径方向 dr 、円周方向 L_r 、厚さ L_z （トンネルの軸方向）の扇形要素を示し、 dr 範囲において接線方向応力 σ_t が均一に、またボルトと地山の境界面に働くせん断応力が一様に分布するものとする。これにより得られる微小要素の釣合と Mohr-Coulomb の破壊規準により、ロックボルトと地山との釣合に関する微分方程式が次のように得られる。

$$\frac{ds_r}{dr} + \frac{[1-(1-b)K_p]}{r} s_r = \frac{(1-b)s_c}{r} \quad (1)$$

ただし、 σ_c ：一軸圧縮強度、 σ_r ：半径方向応力、 K_p ：強度定数、 β ：打設密度係数、 t_c ：ライニング厚、 a ：トンネル半径、 L ：ロックボルト長、 U_a ：壁面変位、 U_a/a ：内空壁面ひずみ、 K_c ：ライニングの弾性係数、 $K_c U_a$ ：ライニングによる内圧である。

2.2 応力分布・塑性半径の解析

まず、ロックボルトの軸応力分布については、ボルト長に沿ってせん断力の向きが途中で逆向きとなる点では軸応力が最大、せん断力がゼロとなり、この点をニュートラルポイントと呼ぶことにし、トンネル中心からこの点までの距離を ρ とする。ここで、式(1)を半径方向応力が $r=R_e$ （弾塑性境界半径）と $r=R_f$ （塑性流動領域半径）の境界において連続する条件からロックボルトの打設に伴う周辺地山中の応力分布を求めることができ、図 - 1(a)に示すように a, R_f, R_e と $\rho, L_1 (=a+L)$ の位置関係により 9 ケースの理論解を導いた。さらに、求められた半径方向応力式に $r=a$ のとき $\sigma_r=K_c U_a$ を代入することにより、ロックボルトとライニングの効果を考慮した塑性半径の理論解を求めることができた（紙面上の都合で誘導過程は省略する）。

3. 塑性領域および壁面ひずみに及ぼす影響

図 - 2 は、初期地山応力 (P_0) が 5.0MPa で、ボルトの打設密度係数 (β) と塑性半径、壁面ひずみとの関係を示す。なお、地山の一軸圧縮強度と初期地山応力の比で定義された地山強度比 ($S_{rp} = \sigma_c / P_0$) は 0.1 ~ 1.0 と変化させた。

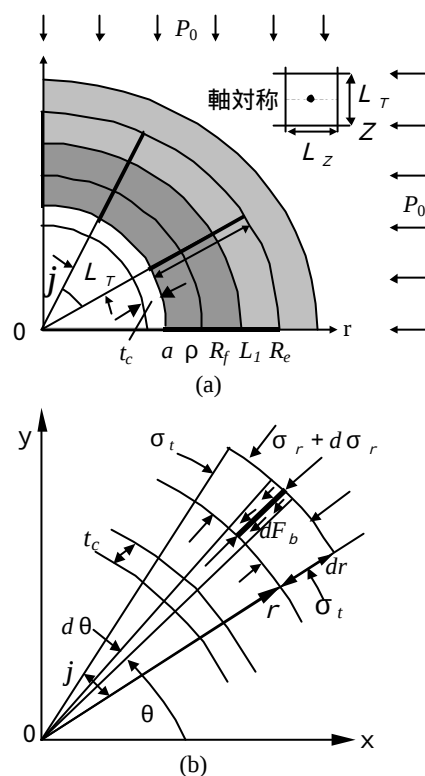


図 - 1 支保工と地山との相互作用

キーワード：軟岩地山，トンネル，ロックボルト，ライニング，打設密度

連絡先：〒852-8521 長崎市文教町 1-14 長崎大学工学部社会開発工学科 Tel：(095)843-7229, Fax：(095)848-3624

S_{rp} が 0.2 以下または 0.6 以上の場合，塑性半径，壁面ひずみは，あまり β に影響されないが， S_{rp} が 0.3～0.5 の場合， β の増加に伴い，塑性半径，壁面ひずみはともに減少し，特に $S_{rp}=0.5$ では， β が 0.65～0.8 の間に大きく減少し，それ以降は一定に近づく。このことから打設密度係数に関しては，ロックボルトの効果が有効に発揮できるかどうかは，地山強度比に大いに支配されると考えられる。また，図 - 2 (b)からは， S_{rp} が 0.8 以上になると，ロックボルトの打設により塑性流動領域が発生しなくなることが分かる。

解析結果の一例として，図 - 3 (a)には，ボルト・ライニングが壁面ひずみを抑制した割合 $((\Delta U_d/a)/(U_d/a))$ と，打設密度係数，ロックボルト長比 (L/a) の関係を，図 - 3 (b)にはロックボルトのみで抑制した割合を示す。これらから，図 - 3 (c)に，変形抑制に対する支保工の分担割合を表す。縦軸は，ライニングで抑制させた壁面ひずみ $(\Delta U_{dL}/a)$ をボルト・ライニングで抑制させた分の壁面ひずみ $(\Delta U_d/a)$ で除したものである。例えば，図 - 3 (a) ($L/a=0.6$) では β の増加に伴い変形ひずみの抑制割合は増加しているのに対し，図 - 3 (b) ($L/a=0.6$) では， β が 0.7 付近からボルトの抑制割合が急激に増加している。また，図 - 3 (c)では，曲面より下であればライニングの作用効果を表し，上であればロックボルトの作用効果を表す。このようなグラフを用いることにより，変形抑制に対する支保工の作用分担効果を定量的に把握することが可能であると考えられる。

4. おわりに

本研究では，ロックボルト，ライニングの作用効果を定量的に解明できる理論手法を示した。今後は，ロックボルトと地山との相互作用を地山特性曲線に適用して，ロックボルト・ライニングの合理的設計法についてさらに検討していきたい。

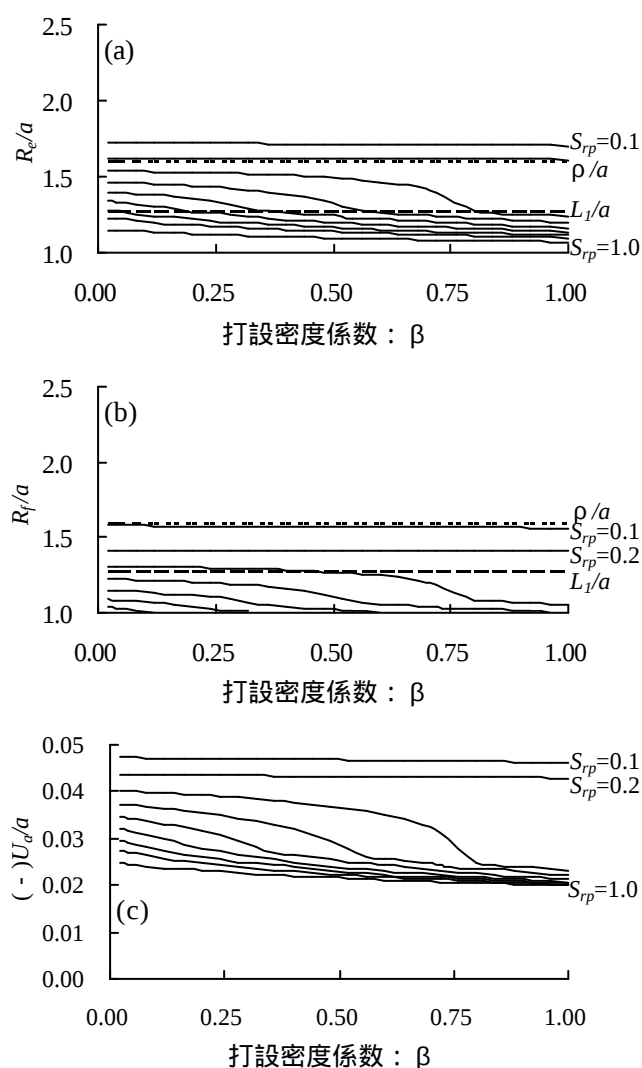


図 - 2 打設密度が塑性半径と壁面ひずみに及ぼす影響 ($L/a=0.6, t_c=0.3m$)

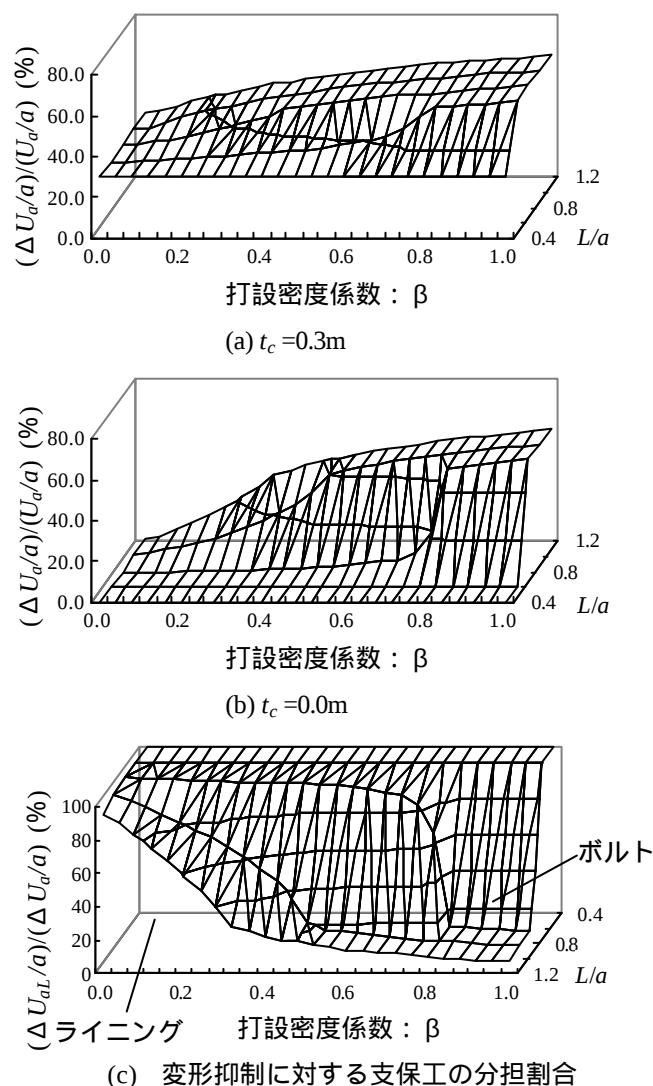


図 - 3 壁面ひずみに対する $\beta \cdot L/a \cdot t_c$ の作用効果 ($S_{rp}=0.3, t_c=0.3$)