

## III-359 吹付けコンクリートとロックボルトの支保効果について

筑波大学 学生員 箱石安彦

筑波大学 正員 西岡 隆

## 1. 序

吹付けコンクリートとロックボルトを支保とするトンネル工法は多くの実績を持つにもかかわらず、その支保理論は現在のところ明確にされていない。本研究は、吹付けコンクリートとロックボルトの支保効果を形状弾性ひずみエネルギーを指標として定量的に評価しようとしたものである。ここで、形状弾性ひずみエネルギーとは、物体の形状変化に關与するエネルギーで降伏に關与し、大きいほど物体は降伏しやすい。

## 2. 吹付けコンクリートとロックボルトの支保効果の定量的評価

トンネル施工状態を(図1)のように4状態に分け、各状態での単位体積当たりの形状弾性ひずみエネルギーを求める。ここで、トンネル空洞は円孔とし円孔周辺地山は平面ひずみ状態の無限弾性体と仮定する。また円孔から十分遠方で鉛直方向に $-s$ 、水平方向に $-ks$ の圧縮応力が一様に作用しているものとする。 $k$ は側圧係数で、ここでは $k=\nu_R/(1-\nu_R)$ と仮定してみた。 $\nu_R$ は地山のポアソン比である。

図1

| トンネル 施工状態                                                 | モデル | 形状弾性ひずみエネルギーの式                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|-----------------------------------------------------------|-----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 状態<br>掘<br>削<br>前                                         |     | $U_{s^{(1)}} = S^2 \{ (1+k)^2 (1-2\nu_R)^2 + 3(1-k)^2 \} / (24G_R)$<br><br>$G_R$ : 地山のせん断弾性係数                                                                                                                                                                                                                                                            |
| 状態<br>無<br>支<br>保                                         |     | $U_{s^{(2)}} = U_{s^{(1)}} + S^2 \{ 3(1+k)^2 x^4 + 3(1-k)^2 (4x^2 - 2x^4 - 12x^6 + 9x^8) + (1+k)(1-k)[16(1-\nu_R+\nu_R^2)x^2 - 6(x^2+2x^4-3x^6)]\cos(2\theta) + (1-k)^2[16(1-\nu_R+\nu_R^2)x^4 - 24(x^2-x^4)]\cos^2(2\theta) \} / (24G_R)$<br><br>$x = (r/r_0)$ $r_0$ : トンネル半径                                                                           |
| 状態<br>吹<br>付<br>け<br>コ<br>ン<br>ク<br>リ<br>ー<br>ト<br>施<br>工 |     | $U_{s,c} = U_{s^{(2)}} - U_{s^{(3)}}$<br>$U_{s^{(3)}} = S^2 (t/r_0) \{ 3(1+k)^2 x^4 / \eta_1 + 3(1-k)^2 (3-4\nu_R)(x^2 - x^4 - 9x^6 + 9x^8) + (1+k)(1-k)[(3-4\nu_R)\{4(1-\nu_R+\nu_R^2)x^2 - 3(x^2+x^4-3x^6)\} / \eta_2 - 6x^2 / \eta_1] \cos(2\theta) + 2(1-k)^2 (3-4\nu_R)[4(1-\nu_R+\nu_R^2)x^4 - 3(x^2-2x^4)] \cos^2(2\theta) / \eta_2 \} / (12G_R)$ |
| 状態<br>ロ<br>ッ<br>ク<br>ボ<br>ル<br>ト<br>施<br>工                |     | $U_{s,b} = U_{s^{(2)}} - U_{s^{(4)}}$<br>$U_{s^{(4)}} = S^2 \alpha_B \{ (1+k)x^4 + (1-k)(x^2 - 2x^4 + 3x^6) \cos(2\theta) - \alpha_B x^4 \} / (2G_R)$<br><br>$\alpha_B = P_0/S$ : ロックボルト比                                                                                                                                                                |

$$\eta_1 = (1-\nu_c^2)E_R / (1+\nu_R) / E_c + \{1 - (1+\nu_c)E_R / (1+\nu_R) / E_c\} (t/r_0)$$

$$\eta_2 = (1-\nu_c^2)E_R / (1+\nu_R) / E_c + \{3-2\nu_R+2\nu_c(1+\nu_c)E_R / (1+\nu_R) / E_c\} (t/r_0)$$

$$E_R$$
: 地山の变形係数、 $E_c$ : 吹付けコンクリートの变形係数  $\nu_c$ : 吹付けコンクリートのポアソン比

トンネル掘削直後、空洞周辺地山は切羽前面の拘束により、状態1と状態2の間の状態にある。ここでは、掘削直後の形状弾性ひずみエネルギー状態は $U_{s^{(1)}}$ を保っている理想的な場合を想定する。掘削直後に、吹付けコンクリート、ロックボルト施工すれば、形状弾性ひずみエネルギーは無支保施工の場合の値 $U_{s^{(2)}}$ よりもそれぞれ $U_{s^{(3)}}$ 、 $U_{s^{(4)}}$ だけ小さな値に食い止めることができる。支保効果は形状弾性ひずみエネルギーの増大を食い止める効果と言い替えることができる。形状弾性ひずみエネルギーは側壁( $r=r_0$ ;  $\theta=0^\circ$ )で最大となり最も危険となる。ここで、エネルギー改善率 $E_{rr,c}$ 、 $E_{rr,b}$ を次式のように定義する。

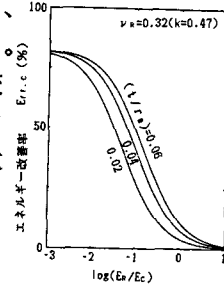
$$E_{rr,c} = U_{s^{(3)}} |_{r=r_0, \theta=0^\circ} / (U_{s^{(2)}} |_{r=r_0, \theta=0^\circ} - U_{s^{(1)}} |_{r=r_0, \theta=0^\circ}) \times 100 \quad (\%)$$

$$E_{rr,b} = U_{s^{(4)}} |_{r=r_0, \theta=0^\circ} / (U_{s^{(2)}} |_{r=r_0, \theta=0^\circ} - U_{s^{(1)}} |_{r=r_0, \theta=0^\circ}) \times 100 \quad (\%)$$

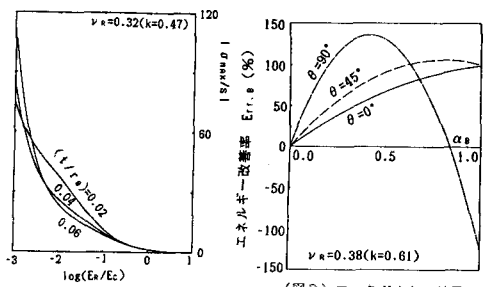
分母は、無支保施工の場合、掘削前状態から増す形状弾性ひずみエネルギーを表し、分子はそれぞれ吹付けコンクリート、ロックボルト施工することによって食い止めることのできる形状弾性ひずみエネルギーを表

す。 $E_{rr}=100\%$ であれば、施工後も掘削前のエネルギー状態を保つことができるが、 $E_{rr}=0\%$ であれば支保の効果は無く無支保施工と変わらないことを示す。一例として（図2）、（図3）に吹付けコンクリート、ロックボルトの効果を示す。ただし、

$E_c=3.4 \times 10^5 \text{ tonf/m}^2$ 、 $\nu_c=0.17$ とする。吹付けコンクリートの効果は地山の変形係数 $E_R$ が小さいほど大きい、コンクリートリングに生じる円周方向最大圧縮応力も大きくなる。吹付けコンクリートの効果は、土被りに関係ない。ロックボルトの性状から判断すると、 $\alpha_B < 0.1$ で、土被りが小さいほど効果が大きい。



（図2）吹付けコンクリートの効果と、コンクリートリングに生じる最大圧縮応力

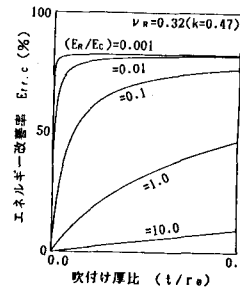


（図3）ロックボルトの効果

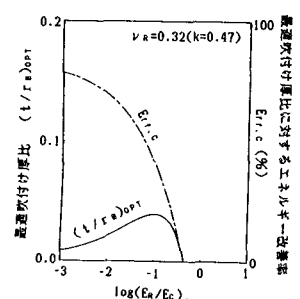
### 3. 形状弾性ひずみエネルギーのトンネルの合理的設計と、降伏判定への導入

#### 3.1 最適吹付け厚さについて

吹付けコンクリートは、 $E_{rr,c}$ を大きくするように打設するのが良い。吹付け厚比 $(t/r_0)$ が $E_{rr,c}$ に及ぼす影響を考える（図4）。 $(E_R/E_c)$ が異なると同じ吹付け厚比でも  $E_{rr,c}$ がかなり違うことがわかる。吹付け厚比の増分 $\Delta(t/r_0)$ に対して、それに見合うだけのエネルギー改善率の増加 $\Delta E_{rr,c}$ が得られなければ、吹付けコンクリートの効果は殆ど無いと判断することができる。ここで、 $\{d(E_{rr,c})/d(t/r_0)\} < C$  を満足する最大値 $(t/r_0)$ を最適吹付け厚比として導入する。（図5）は $C=500$ とし、 $\nu_R=0.32$  ( $k=0.47$ ) の場合について、 $(E_R/E_c)$ に対する最適吹付け厚比、及びその最適吹付け厚比に対するエネルギー改善率を示したものである。これは、半径 5m のトンネルを考えた場合には、コンクリートを吹付け厚30cmで打設すれば、エネルギー改善率が30%得られる場合に相当する。



（図4）吹付け厚比とエネルギー改善率



（図5）最適吹付け厚比

#### 3.2 降伏判定への導入

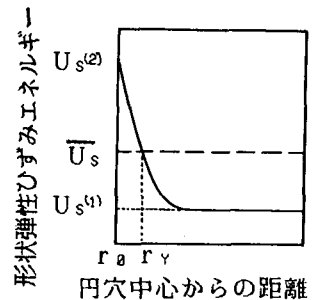
形状弾性ひずみエネルギーが、ある値 $\overline{U}_s$ に達したときにトンネルが降伏すると考える。つまり（図6）においては、 $r_0 < r < r_v$  の領域が降伏するとになる。ここで、次式をエネルギー必要改善率として導入する。

$$E_{rr, \text{NEED}} = \left( U_s^{(2)} \Big|_{r=r_0, \theta=0^\circ} - \overline{U}_s \right) / \left( U_s^{(2)} \Big|_{r=r_0, \theta=0^\circ} - U_s^{(1)} \Big|_{r=r_0, \theta=0^\circ} \right) \times 100 \quad (\%)$$

この量は、トンネルが降伏しないためには、どれだけのエネルギー改善率が必要かを表す。この $E_{rr, \text{NEED}}$ 及び $E_{rr,c}$ 、 $E_{rr,B}$ を用いれば合理的な設計が可能となる。 $\overline{U}_s$ は、von Mises、Drucker-Prager などの各種降伏条件から決定することができる。又、過去のデータを整理して経験的に決定することもできる。

#### 4. あとがき

今後は、重力場を考慮に入れ土圧論との関連を明らかにすると共に、馬蹄形断面で考える必要がある。さらに、側圧係数についての検討、地山の物性の正確な把握が必要である。



（図6）