

### III-294 非線形軟岩トンネルにおけるロックボルト効果

近畿大学理工学部 久武 勝保  
西松建設(株) 稲葉 力  
近畿大学大学院 渋谷 卓

#### 1. 著 論

本研究は軟岩トンネルにおけるロックボルトの変位拘束効果を明らかにするために、軟岩の応力-ひずみ関係の非線形性、拘束圧依存性を考慮した初期応力法による非線形解析を行い、考察を加えたものである。

#### 2. 解析条件

等方初期応力（P）の作用する地山において、切羽から十分離れその影響の及ばない位置での円形トンネルの解析を行うこととする。一定奥行き（W）を有するトンネル周辺領域を有限要素分割し、掘削にともない初期応力が解放されると仮定して3次元非線形解析を行うこととする。軟岩の応力-ひずみ関係の非線形性を表現するために、ピーク強度に達するまでは八面体平面上のせん断応力 $\tau_{oct}$ とせん断ひずみ $\gamma_{oct}$ の関係を表す双曲線で近似する（図-1）<sup>1)</sup>。

$$\tau_{oct} = \frac{\gamma_{oct}}{e + f \cdot \gamma_{oct}} \quad (1)$$

ここに  $e = \frac{1}{G_1}$ ,  $f = \frac{R_f}{\tau_{oct, f}}$ ,  $R_f = \frac{\tau_{oct, f}}{\tau_{oct, ult}}$

$G_1$ は初期接線係数、 $\tau_{oct, f}$ は測定される最大応力、 $\tau_{oct, ult}$ は双曲線モデルでの終局最大応力である。また $R_f$ は0から1の間の値をとり、1に近づく程非線形性が強い。岩のピーク強度は普通非線形で表されるので、以下の降伏条件式を採用する。

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sqrt{m \sigma_c \sigma_3 + s \sigma_c^2} \quad (2)$$

ここに、 $\sigma_c$ は一軸圧縮強度、 $s$ と $m$ は岩の特性に応じて決まる材料定数である。

#### 3. 考 察

本解析で用いた条件を表-1に示す。図-2の曲線は、壁面変位の拘束効果に及ぼす吹き付けコンクリートの内圧比（ $p_i/P$ ； $p_i$ は内圧）の効果について、また直線はロックボルト打設時の壁面変位を表したものである。図中の曲線とロックボルト打設時の壁面変位の直線が交差する点は、両者の変位拘束効果が同一であることを示しているので、この点で示される内圧比のことを変位拘束効果の点から、ロックボルトと吹き付けコンクリートの等価内圧比 [A] と以後称する。図-3は [A] に及ぼす $\sigma_c/P$ 及び $R_f$ の影響を表したものであるが、これから $R_f$ の違いにより [A] の値は余り変化はないが、しかし $\sigma_c/P$ が小である地山程、[A] の値は大であり、内圧換算したロックボルト効果は増大する。図-4 (A)、(B) はロックボルト打設時（\*付き）と素掘時における地山強度（ $\tau_{oct, f}$ ）の比（図-4 (A)）、と接線係数（ $G_1$ ）の比（図-4 (B)）を示したものである。ただし図-4では、使用ロックボルト総量は同一であるがその長さを半分（1.5m）、打設密度を2倍にした結果も示している。打設によって地山の拘束圧低下が抑制され、従って図-4に示すように壁面に近い所程、素掘時に比べて地山強度及び接線係数は大である。また、本解析条件下ではロックボルトを短く密に打設する方で地山材料の改善効果が上がるのが理解できる。

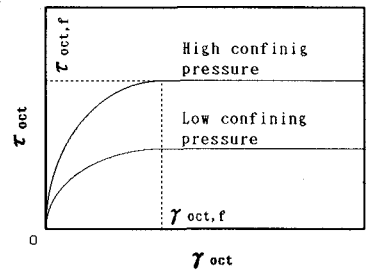


図-1 地山材料の構成関係

表-1 解析条件

トンネル半径 ( $r_i$ )	3.0(m)
トンネル軸方向地山要素厚 (W)	2.0(m)
強度パラメーター (m)	2.5
強度パラメーター (s)	1.0
ポアソン比 ( $\nu$ )	0.3
一軸圧縮強度 ( $\sigma_c$ )	154~924(tf/m <sup>2</sup> )
$G_1/\tau_{oct, f}$	184.0
非線形パラメーター	0.001~0.8
初期応力 (P)	308.0(tf/m <sup>2</sup> )
ロックボルトの長さ ( $L_n$ )	3(m)
ロックボルトの弾性係数	$2.1 \times 10^7$ (tf/m <sup>2</sup> )
ロックボルトの断面積	$5.08 \times 10^{-4}$ (m <sup>2</sup> )
一断面当たりロックボルト本数	32(本)
縦断面ロックボルト打設間隔	2(m)

ところで、素掘時の地山任意点におけるトンネル半径方向応力、及び強度をそれぞれ  $(\sigma_r^\circ)$ 、 $(\tau_{oct,r}^\circ)$ 、またロックボルト打設時のそれらを  $(\sigma_r^\circ + \Delta\sigma_r)$ 、 $(\tau_{oct,r}^\circ + \Delta\tau_{oct,r})$  と表せば、ロックボルトを打設する事による強度増分  $(\Delta\tau_{oct,r})$  は以下の様に表現できる。

$$\frac{\Delta\tau_{oct,r}}{\tau_{oct,r}^\circ} = \sqrt{1 + \frac{m(\Delta\sigma_r/\sigma_c)}{m(\sigma_r^\circ/\sigma_c) + s}} - 1 \quad (3)$$

ただし、トンネル軸方向応力は  $0.5(\sigma_\theta + \sigma_r)$  と仮定した<sup>2)</sup>。式(3)より  $(\Delta\tau_{oct,r})$  は  $(\Delta\sigma_r/\sigma_c)$  が大である程大であり、また  $(\sigma_r^\circ/\sigma_c)$  が小である程  $(\Delta\sigma_r/\sigma_c)$  の効果は大であるといえる。トンネル壁面近くでは  $(\sigma_r^\circ/\sigma_c)$  は  $(\sigma_c/P)$  が小である程小であるから、 $(\sigma_c/P)$  が小なる地山ほど強度低下を抑制するロックボルトの効果は大となる。一方、打設時の地山任意点の  $(G_i^*)$  は、その点の素掘時  $(G_i^\circ)$  に比べ、次式の様に増大する。

$$G_i^* = G_i^\circ (1 + \Delta\tau_{oct,r}/\tau_{oct,r}^\circ) = G_i^\circ \sqrt{1 + \frac{m(\Delta\sigma_r/\sigma_c)}{m(\sigma_r^\circ/\sigma_c) + s}} \quad (4)$$

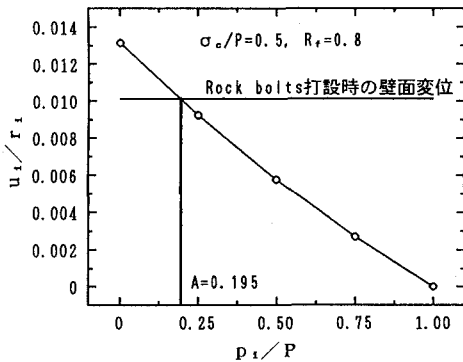


図-2 壁面変位の拘束効果

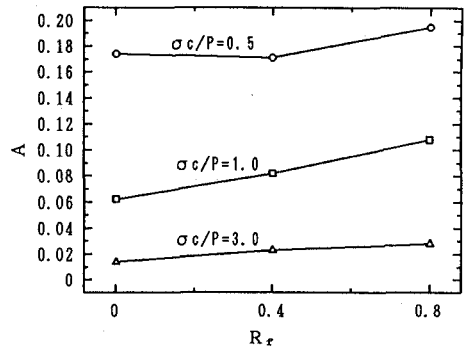


図-3 等価内圧比 [A] に及ぼす地山強度比と非線形パラメーターの影響

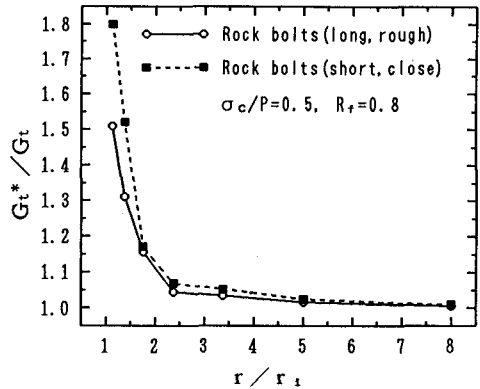
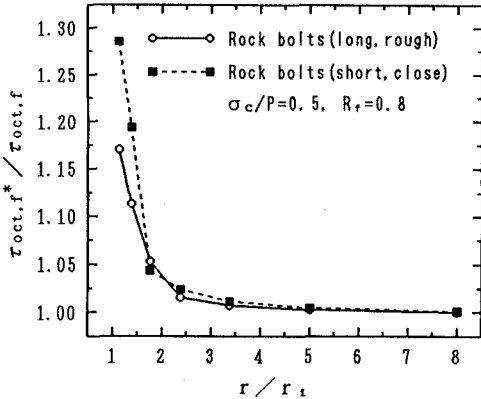


図-4 ロックボルト打設時(\*付き)と素掘時における地山強度の比(A)、及び接線係数の比(B)

#### 4. 結論

(1) 吹き付けコンクリートの内圧効果に換算したロックボルトの変位拘束効果は、応力-ひずみ関係の非線形性の影響よりも地山強度比の影響を強く受ける。(2) 本解析条件下において同量のロックボルトを使用する場合には、長く疎に打設するよりも短く密に打設する方で、効果が大きい。(3) ロックボルトの打設により地山の強度、接線係数の低下が抑制されるが、それを定量的に評価する式を示した。

#### 参考文献

- 1) 久武、桜井、伊藤:土木学会論文集、第418号、1990。 2) 久武、伊藤、朝倉:土木学会論文集、第400号、1988。