

徳島大学工学部 正員 小田英一
徳島大学工学部 正員 堀田政國
徳島大学大学院 学員 ○ 笠井敬正

1. はじめに

NATM工法は、ロックボルト、可縮性鋼製支保工及び薄肉吹付けコンクリートを主たる支保メンバーとする工法であり、地圧が発生する岩盤の支保工としてすぐれた実績をあげ、また都市トンネルにも採用され地表沈下が少ないことも実証されて最近ひじょうに注目されている工法である。

そこで本論文では、NATM工法の支保メンバーの一つであるロックボルトについて、トンネル模型実験を行うことによりトンネル周辺地山の塑性域内のすべり線及びトンネル周縁の変位などを解析し、ロックボルトの作用効果も考察しようとするものである。

2. 実験概要及び結果

粘土を $600 \times 700 \times 100$ [mm] の圧密箱につめ、上部からの載荷により一週間圧密を行い、その後除荷し、 600×700 [mm] の面に半径 80 [mm] の円形トンネルを掘り、そのトンネル内面にロックボルトを放射状に挿入した。ボルトの奥行き方向のピッチはどの場合も 30 [mm] にして 3 列に並んでおり、ボルト本数としては、0 本、 8×3 本、 16×3 本、 24×3 本、の 4 つのケースに分類した。そして、ボルト挿入後に再載荷し、トンネル周辺塑性域内のすべり線の模様を観察した。

以上の様にして実験を行った結果の一例を図-1 及び図-2 に示す。図-2 においては、ボルト本数が増加するにつれて、すべり線に沿うズレ変位量は減少する傾向にあることがわかる。

3. 理論及び考察

この実験によって生じたすべり線の模様と、応力平衡条件及び臨界条件より求めたすべり線¹⁾の特性曲線とを比較し、ロックボルトを挿入することにより、地山の強度がどの程度改善されたのか調べてみた。図-3 はボルトを用いない場合のすべり線²⁾で、内部摩擦角 $\rho = 28.0^\circ$ のすべり線の特性曲線と一致し、図-4 はボルト本数が 48 本の場合のすべり線²⁾で、内部摩擦角 $\rho = 36.0^\circ$ のすべり線の特性曲線と一致している。つまり、ロックボルトを挿入することにより地山の内部摩擦角が見かけ上増加していることがわかる。

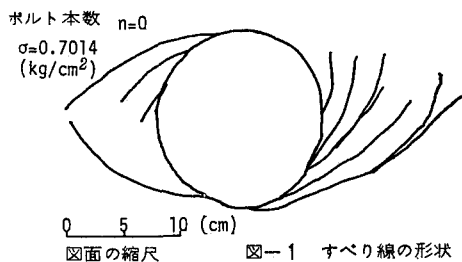


図-1 すべり線の形状

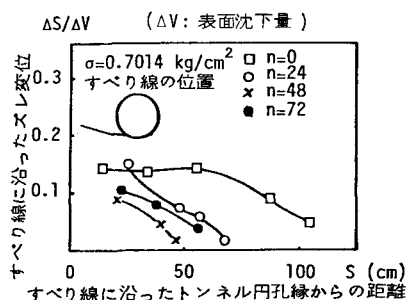


図-2 すべり線に沿った変位

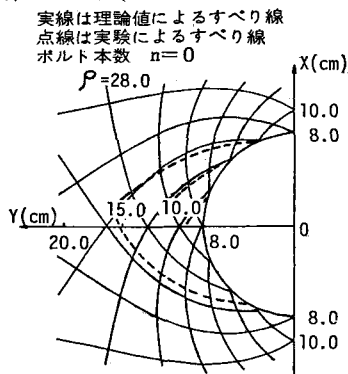


図-3 すべり線図

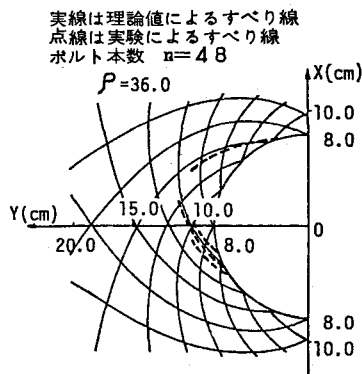


図-4 すべり線図

そこで、ロックボルト挿入時のような異質材料により地山を補強する時の強度定数の変化について理論的に考

察を行う。

図-5に示すような、セン断されがロックボルトで補強した場合のすべり線に沿ったセン断強度定数を考える。H:すべり線で切られたロックボルトの長さ、D:ロックボルトの直径、 A_c :すべり線上の粘土部分の面積、とすると、粘土自身が受け持つセン断力 S_c は $S_c = A_c(C + \sigma \tan \phi)$ 、ロックボルトにかかる受働土圧により受け持たれるセン断力 S_R は $S_R = H \cdot D \{ \sigma \tan^2(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}) + 2C \tan(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}) \}$ 、従って、A:すべり線上の粘土の面積とロックボルト断面積の合計として、セン断応力では

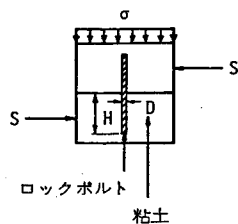


図-5

$$\tau = \frac{S}{A} = \frac{1}{A} (S_c + S_R) = \frac{1}{A} \left\{ A_c \cdot C + 2HDC \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right\} + \frac{1}{A} \left\{ A_c \tan \phi + HD \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right\} \sigma \quad (1)$$

と行う。ロックボルトを挿入した場合の見かけ上のセン断強度定数を C_0, ϕ_0 、とすると

$$\tau = C_0 + \sigma \tan \phi_0 \quad (2)$$

となり、(1)式と(2)式とは等値であることより

$$C_0 = \frac{1}{A} \left\{ A_c C + 2HDC \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right\}, \quad \phi_0 = \tan^{-1} \left\{ \frac{1}{A} \left\{ A_c \tan \phi + HD \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right\} \right\} \quad (3)$$

ここで、 $A = A_c$ とすると

$$C_0 = C + \frac{2HDC}{A} \tan\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right), \quad \phi_0 = \tan^{-1} \left\{ \tan \phi + \frac{HD}{A} \tan^2\left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi}{2}\right) \right\} \quad (4)$$

となり、ロックボルト挿入による地山のセン断強度定数の増加量がわかる。つまり、ロックボルト挿入によるセン断強度定数は HD/A の項に影響されると考えられる。

この時、 D, H, S は図-6に示したように定め、Aはロックボルト1本が受け持つすべり線に沿う断面積である。すなわち、 $A = (\text{図-6の} S) \times (\text{トンネル軸方向ピッチ})$ 。

上述の理論を用いた計算結果を表-1に示す。ここで、 $C: 0.04 \text{ kg/cm}^2$, $\phi: 30^\circ$, $D: 3.5 \text{ mm}$, ϕ'_0 : トンネル模型実験のすべり線より求めた内部摩擦角である。この結果を見てみると、 ϕ_0 と ϕ' は、じつに近い値を示している。

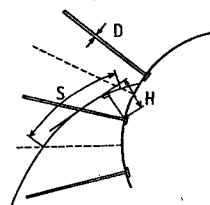


図-6

表-1

本数 n	H(mm)	A(mm ²)	C_0 (kg/cm ²)	ϕ_0	ϕ_0 (平均)	ϕ_0	ϕ'
24	20.10	2080.4	0.045	34.17		34.17	34
48	10.58	923.1	0.046	34.91			
	12.74	823.2	0.048	36.50	35.71	35.71	36
72	17.82	653.4	0.053	40.82			
	7.92	647.5	0.046	35.21	38.02		
	30.89	653.4	0.063	47.03			
	21.78	724.7	0.055	41.76			
	9.90	653.4	0.047	36.35	41.72	39.87	38

今回の研究において次のような結果を得た。

(i) すべり線形状は、主に地山の内部摩擦角に依存し、粘着力の影響は少ない。

(ii) 地山の内部摩擦角が増加すると、それに伴い、すべり線が円周に接近する。すなわち、すべり線が円周領域が狭められる。

(iii) トンネル模型実験において、ロックボルトの挿入本数が増加すると、すべり線形状が円周方向に接近し、見かけ上の土のセン断強度定数は増加する傾向にある。

(iv) ロックボルトの挿入による見かけ上の土のセン断強度定数の増加は、ロックボルトに作用する受働土圧を考慮したものとはよく一致し、ロックボルトの径、挿入深さ及び挿入本数により決定される定数 HD/A に影響される。

参考文献

- Oda, E. and T. Yamagami, : Proc. of 2nd International Conference on Numerical Methods in Geomechanics, Vol II, June 1976, pp.847~858.