

III-382 ロックボルトの長さについての考察

飛島建設（株）
同上正会員 福島啓一
正会員 長谷川昌弘

1. はじめに

NATMの支保部材としては、吹付けコンクリートとロックボルトが主役である。その効果、役割はいろいろ言われているが、力学的には内圧効果として表すのが最も一般的であり、理解もされやすい。しかしロックボルトの効果を内圧効果で表すと、アンカー点では逆方向の力、荷重として働く方向の力が働く筈だと心配される。またボルトの長さの効果、——長いボルトと短いボルトの効果の差、などが不明である。ここでは弾性計算によりボルトの効果を求め、弾索性の場合についても推定を示す。

2. 弾性計算

弾性体の地山内に円形のトンネルを掘った場合について考える（図1）。内径 a 、外径 b のリング状の地山が両端定着式のボルトで補強され、さらに内側には、吹付けコンクリートや鋼アーチ支保工などによる内圧 p_i が、外側には地山からの外圧 p_b が働いているとする。内側、外側の境界上では、力の釣合い、変位の一致が成立っている筈であるから次式が成立つ。

$$\text{支保工による内圧 } p_i = [E_c t / \{a^2 (1 - \nu_c^2)\} + \{E_s A_s / a^2\}] u_A \quad \dots\dots\dots (1)$$

$$\text{ボルトによる内圧 } p_{iA} = \{T_{Ap} + E_s A_b (u_A - u_B) / (b - a)\} / (g * h) \quad \dots\dots\dots (2)$$

$$\text{ボルトによる外圧 } p_{bA} = p_{iA} * (a / b) \quad \dots\dots\dots (3)$$

$$\text{地山からの外圧 } p_b = p_0 - (u_B / b) * E / (1 + \nu) = p_0 - (u_A * a / b^2) * E / (1 + \nu) \quad \dots\dots\dots (4)$$

ここに、 u_A, u_B ； a 点、 b 点の変位、 u_A, u_B ； a 点、 b 点の支保工、ボルト設置後の変位。弾性体では $u_B = u_A * a / b$ である。ボルトによる力は、次の様に内圧と外圧の差として考えるほうが簡単である。

$$\begin{aligned} \Delta p_A &= p_{iA} (1 - a / b) = \{T_{Ap} + E_s A_b * u_A / b\} / (g * h) * (1 - a / b) \\ &= T_{Ap} * l / (g * h * b) + (u_A / a) * E_s A_b * a * l / (g * h * b^2) \quad \dots\dots\dots (5) \end{aligned}$$

これより両端定着アンカーでは、ボルトが長くなると、（ b が大きくなると）、内圧効果は減ること、特にプレストレス T_{Ap} がないときは、著しく減ることが分る。

支保工の効果の一つの目安として地山変位の防止効果を取上げることが出来る。支保工設置後のトンネルの内空変位は次式で計算される。（図2参照）

$$\text{変位量 } u_A = \frac{\text{初期地圧} - (\text{支保工設置前に解放された地圧} + \text{プレストレス内圧})}{\text{地山剛性} + \Sigma \text{支保工の剛性率}} \quad \dots\dots\dots (6)$$

両端固定のボルトの剛性率は(5)式より $E_s A_b / (g * h) * (a * l / b^2)$ で表される。全面接着式のボルトは $b \rightarrow a, l = b - a \rightarrow 0$ で、 a がボルトの長さの分だけ変化すると考えれば良い。従って

$$\frac{E_s A_b}{g * h} * \frac{a * l}{b^2} \rightarrow \frac{E_s A_b}{g * h} \int_b^a \frac{dr}{r} = \frac{E_s A_b}{g * h} \ln \frac{b}{a} \quad \dots\dots\dots (7)$$

となる。これより見ると、長いボルトほど一本当りでは有効であるが、1m当りで考えると短いボルトほど有効である。実際のボルトでは、頭部と先端部のある長さ分は有効に働かないので、仮にこの無効分を50cmとすると、半径 $a=5m$ の複線トンネルでは $l=3m$ 位のボルトが最も有効と計算される。

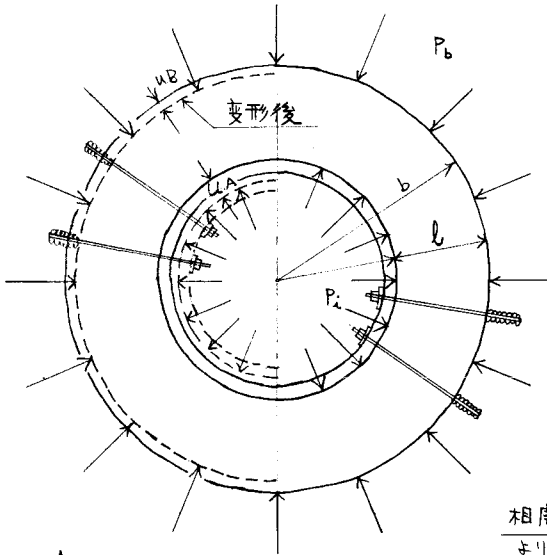
ボルトが非常に有効に働くのは、地山が塑性化した場合であろう。塑性化した場合、地山の体積変化はないとする最も単純な仮定に従えば、地山内のひずみ分布、変位分布は弾性的の場合と同じ形、すなわち $1/r^2$ 、 $1/r$ に比例し、その値が大きいくだけであるから、ボルトの効果も同じ式で求められる。より正確に、直交則と相関流れ則が成立つ場合の地山内のひずみ分布、変位分布を求めると、 $1/r^2$ 、 $1/r$ に正確に比例はしないが、ほぼ直線関係が成立つ。（図3参照）従って、上記の式を使っても誤差は小さいと考えられる。た

だ、地山がその状態になるような時は、ボルトのほうもその状態になるので、応力は一定値（降伏応力）になっているので、この区間は両端固定として解く必要がある。

3. おわりに

従来、ボルトの効果を内圧効果だけで考えていたが、長さの影響を取り入れた式を導くことにより、最も有効な長さのボルトを用いることが出来る。何となく長いボルトが有効であると信じているようなむきもあるが、再考すべきではあるまいか。

内圧効果として考えると、吹付けコンクリートに比べて、ボルトの力は小さく、むしろ地山のゆるみ防止や地山の強化効果をボルトの主な役割とする考え方もあるが、その場合でも、長さの効果の関係はここで述べた計算が成立つ筈である。



△ 図 1

▽ 図 2. 地山応答曲線

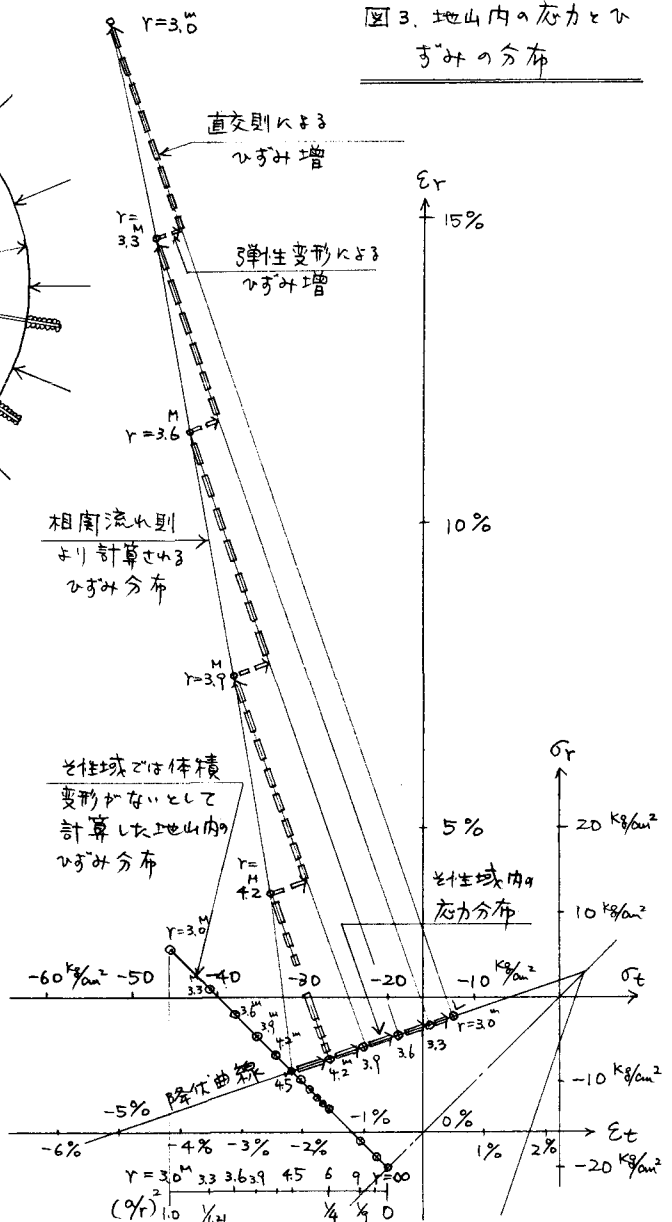
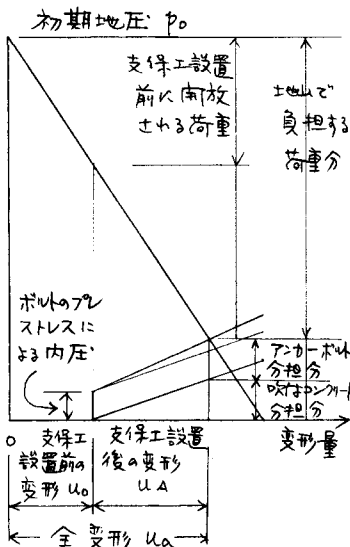


図 3. 地山内の応力とひずみの分布