

東京都立大学 正員 今田 徹

ロックボルトは、種々の地山に対して適用され地山の安定に対して大きな効果のあることが確められている。ロックボルトの地山安定の機構は対象とする地山の種類と使い方によって変ると考えられる。節理等の力学的不連続性が挙動を支配すると考えられる硬岩の場合や、塑性的性質が挙動を支配する軟岩の場合については多くの検討が行われているが、粒状体としての性質が卓越すると考えられる地山についての検討は比較的少ない。そこで粘着力を持たない地山におけるロックボルトの作用効果を明らかにするため、円形トンネルを安定化させるために必要なロックボルトの長さし挿入間隔についての模型実験を行った。

1. 実験方法

実験は図-1に示す高さ60cm、幅40cm、奥行き10cmのアクリル製の箱に鉛の散弾($\phi=2mm$)を詰め地山とし、径10cmのトンネルを設けることによって行った。散弾の単位体積重量は $\gamma=6.89t/cm^3$ 、内部摩擦角は $\phi=30^\circ\sim35^\circ$ である。トンネルの作成方法は、初め箱を水平に置き、ロックボルトと肌落ち防止工を含めたトンネル構造体を所定の位置に設置し、トンネル内外に散弾を少しずつ丁寧に詰めるとともに突き固めを行う。次に前面アクリル板で蓋をし、図-2に示すように箱を直立させる。前面アクリル板にはトンネル部の散弾を抜き取るための円孔が設けられており、次にこの部分を外して徐々に散弾を抜き取る。ロックボルトの量が不足する場合は抜き取る途中で崩落が生ずる。

ロックボルトは径1mmのアクリル線を用い、アクリル線には接着剤を塗布して散弾とアクリル棒とが付着するようにした。アクリル線には散弾が付着し径5~7mm程度の表面が散弾で、覆われた棒が形成される。従って、ロックボルトとしては全面接着型となっているが、ロックボルトと地山との力のやりとりは、アクリル棒に付着した散弾と地山との間で行われることになり、結局径が5~7mm程度で、剪断強度が地山の強度と同じボルトを設置したのと同じ効果を持つような形となっている。

模型地山は粘着力が0であるため、表面を保護しておかないと流動して、ロックボルトだけでは安定を保つことはできない。このため肌落ち防止工が必要であるが、肌落ち防止工としてはロックボルトの効果に影響を与えないものであることが必要である。このためできるだけ強度を持たないものとするため、封筒用紙程度の紙を用いたが、この程度のもので閉合すると軸力が発生し、安定性に大きな影響を与えることが明らかになったので、図-3に示すようにロックボルトとロックボルトの中間で切り肌落ち防止工に軸力が生じないようにした。このようにすると短冊状の肌落ち防止工には散弾が落ちない程度の剛性が要求されるので、厚さ0.5mm程度の工作用紙を用いた。なお、短冊と短冊とは若干重ね合せ、重ね合せた部分に散弾が入らないようにするため薄紙でカバーした。

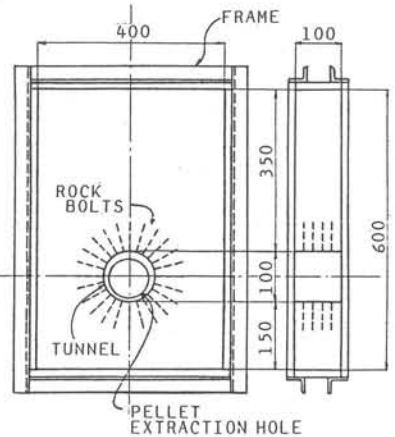


図-1 実験装置

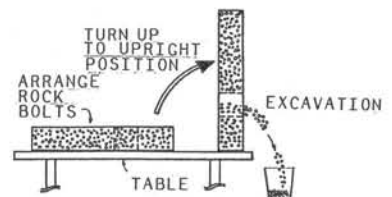


図-2 実験方法

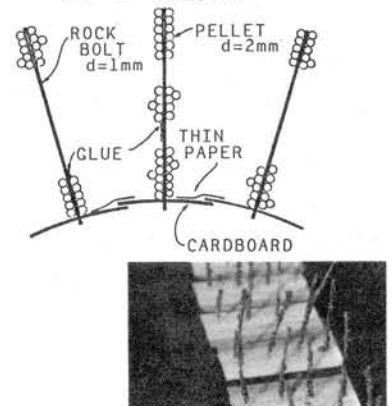


図-3 ロックボルト詳細

2. 実験結果

実験はロックボルトの設置間隔 p および長さ L を変化させてトンネルの安定が得られるかどうかを調べた。結果は図-4に示す通りである。図中の○印の安定とはトンネルが完全に安定した場合を示し、△印の中立とはかろうじて安定が得られた限界的な状態を示し、×印の不安定は散弾を全部抜きとるまでの途中の段階で崩壊したことを示す。散弾を抜き取ると天端は徐々に沈下するが、安定する場合は沈下が一定以上は進行しなくなる。安定する際の天端の沈下量はロックボルトの量が多いほど少ない。限界的な安定状態に対するロックボルトの長さ L と設置間隔 p との比 L/p は、 p が1cmの時2程度、 p が3cmの時3程度で p の増大とともにほぼ直線的に大きくなる傾向が認められる。硬岩におけるロックボルトの設計では、Langの実験の結果などから $L/p \geq 2$ が1つの条件になっているが、粒状体地山における場合は、 p の値によって L/p の値を変える必要があることを示唆する結果となっている。

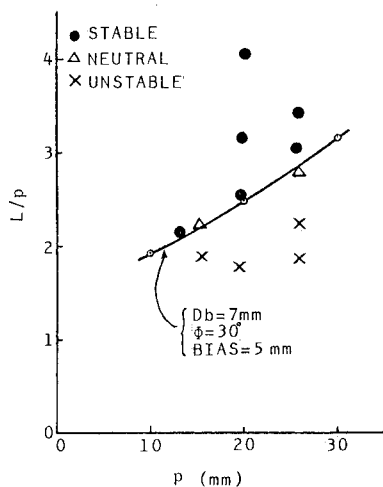


図-4 p と L/p の関係

3. 考察

粒状体地山におけるロックボルトの効果を図-5に示すように模式化して、必要なロックボルトの長さを検討する。図-5は安定上最もクリティカルな条件となると考えられる天端のロックボルトを周辺地山とともに抜き出したもので、天端の地山は肌落ち防止工Aによって支えられ、Aに作用する荷重はロックボルトBによって上方に支持される。ロックボルトに作用する荷重はロックボルトと地山間の摩擦力および付着力によって地山に伝達され、この荷重はこの部分の地山の重量を含めて考えている地山ブロックの側面 $a-b$ 、 $c-d$ を通して側方地山に伝達される。ロックボルトの地表に近い端からの深さ z 、 $z+d$ 間の地山の要素 e と f についての釣合いを考えると

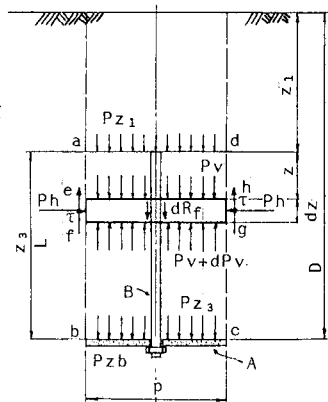


図-5 解析モデル

$$\frac{dP_z}{dz} = \left\{ \left(\gamma + \frac{\theta_0}{p} - \frac{2c}{p} \right) + \frac{1}{p} (d_b - 2\alpha \tan \phi) \cdot P_v \right\} \cdots \cdots (1)$$

が得られる。ここで、 P_v : 深さ z における鉛直方向土圧、 γ : 単位体積重量、 ϕ : 地山の内部摩擦角、 c : 地山の粘着力、 α : 水平方向土圧の鉛直土圧に対する比、 α : ロックボルトの単位長さあたりの摩擦による抵抗力の鉛直土圧に対する係数、 θ_0 : ロックボルトの単位長さあたりの付着力である。(1)式を解き、天端の土圧 P_{z3} を求めると

$$P_{z3} = \frac{d_2}{d_1} (e^{d_1 z_3} - 1) + P_{z1} \cdot e^{d_1 z_3} \cdots \cdots (2)$$

ただし、 $d_1 = (d - 2\alpha \tan \phi)/p$ $d_2 = (\gamma + \theta_0/p - 2c/p)$ P_{z1} : ロックボルト先端における土圧 が得られる。一方、ロックボルト肌落ち防止工取付点の軸力は

$$R_b = \theta z_3 + \alpha \left\{ \left(\frac{d_1}{d_2} + \frac{P_{z1}}{d_2} \right) (e^{d_1 z_3} - 1) - \frac{d_1}{d_2} z_3 \right\} \cdots \cdots (3)$$

となる。 P_{z3} と R_b をロックボルトの分担面積で割った値 P_{zb} を比較し、 P_{z3} の方が大きい場合は不安定、小さい場合は安定であり、限界的状態では等しくなる。実験の状態に対して丁度限界となる L/p を求めると図-4に記入してある曲線が得られる。実験の結果と比較すると良い一致が見られる。実験にあたっては、鄭光司君(現東急建設)の手を煩わせた。ここに謝意を表す。