

(47) 斜面上トンネルにおける縫地ボルト効果に関する模型実験

建設省土木研究所

石村利明

1. はじめに

山岳トンネルの建設の増加に伴い、地形的には斜面下の土被りが薄い場所に、また、地質的には崖錐、強風化層等の非常に軟質な場所に、トンネル坑口部が設置される機会が増える傾向にある。このような条件の場所にトンネルを掘削した場合には、大きい地表面沈下、斜面変状を伴うような地山の変形が発生し易く、また、トンネルに対しても偏土圧が作用することがあるため、各種の補助工法を施しながらトンネルを掘削することが多い。補助工法は、その使用目的に応じて幾つかに分類されるが、近年、特に採用される機会が増えている工法の1つに縫地ボルト工法が挙げられる。これは、地質条件の悪い斜面下にトンネルを掘削する場合、地山に地表面から通常は $\phi 25 \sim 32$ のボルト（鉄筋）を $1.5 \sim 3 \text{ m}^2$ 当たり1本の割合で打設する工法であり、一般には地表面沈下、斜面崩壊、偏土圧の抑制あるいはトンネル切羽の安定化に効果があると考えられている。しかし、その効果のメカニズムについては未解明な点が多いため、地質状態によっては目的とする効果が得られなかったり、合理的な使用になっていない場合が少なくないように思われる。本研究は、以上のような観点から地質条件の悪い斜面の下にトンネルを掘削する場合の縫地ボルトの効果について遠心力を利用した模型実験により調べ、その結果に関して検討を加えたものである。

2. 実験方法

実験には建設省土木研究所に所有の遠心力载荷装置を使用した。装置の性能は有効半径 1.15m , 最大加速度 300G であり、装置に取り付けられる試験容器の内寸は幅 50cm、高さ 40cm、奥行き 12.8cmである。実験方法は、図-1に示すように水が充填された外径 $D=5\text{cm}$ 、厚さ 0.02cm のゴムチューブを地山作製時に予め埋め込んで置き、遠心力により所定の重力加速度まで载荷した後、ゴムチューブ内の水を抜き出すことによりトンネル陥削をシミュレートした。なお、抜き出した水は試験容器に取り付けたメスシリンダーに導き、トンネルの変形は一樣であるものと仮定して排水量からトンネル内空変位量 δ を求めた。また、地山には試験容器前面のアクリル板に接して約 1cm 間隔の格子状

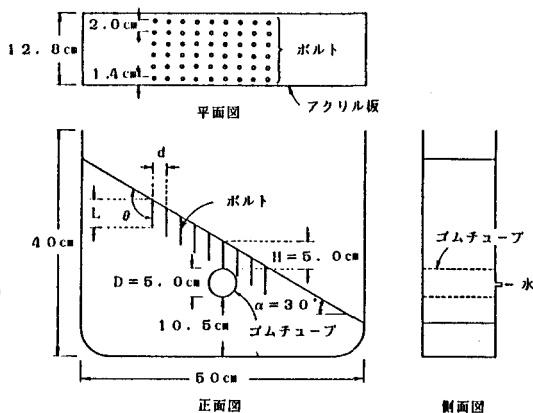


圖-1 實驗裝置概要圖

に標点が埋め込まれており、所定の δ の時に写真撮影を行い、写真からデジタイザーにより地山の変位を求めた。地山の形状は、トンネルクラウンから地表面までの距離 H (土盛り) とトンネル外径 D との比 H/D が 1.0、傾斜角 α が 30° の斜面とし、地山はホッパーから地山材料を落下させて作製した。地山材料には地質条件が悪い場合を想定して気乾状態にある豊浦標準砂を用いており、平均相対密度は $D_r = 80\%$ であった。ボルトには、基本的には $\phi 0.4\text{mm}$ の針金 ($E_A = 2639 \text{ Kg} \cdot \text{f}$, $E_I = 0.264 \text{ Kg} \cdot \text{f} \cdot \text{cm}^2$) の表面にエポキシ系樹脂により砂を付着させたものを用いており、ボルトの長さ $L = 5, 10\text{cm}$, 打設間隔 $d = 1.25, 2.5\text{cm}$, 打設角度 $\theta = 30^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ と変化させた。ただし、トンネル軸方向の打設間隔は 2.0cm で一定とし、一部のケースについては幅 2mm 、厚さ 0.1mm のアルミ板 ($E_A = 1434 \text{ Kg} \cdot \text{f}$, $E_I = 4.78 \text{ Kg} \cdot \text{f} \cdot \text{cm}^2$) に同様の処理を施したのももボルトとして使用した。なお、実験時の重力加速度は、すべて $80G$ としている。したがって、模型に発生する現象は外径 4m のトンネルを砂質土盤に掘削した時の現象に相当し、ボルトに $\phi 0.4\text{mm}$ の針金を使用することは原型では $\phi 32\text{mm}$ のボルトを 1.6m^3 ($d = 1.25\text{cm}$ 時)、 3.2m^3 ($d = 2.5\text{cm}$ 時) に 1 本の割合で打設したことに相当するものと考えられる。

3. 実験結果および考案

3.1 ボルトが無い場合の地山の挙動

トンネルが掘削される地山の形状が斜面となる場合、トンネルの掘削に伴い地山がどのように挙動するかは、あまりよく知られていない。そこで、本実験ではまずボルトが打設されていない斜面の下にトンネルを掘削した場合の地山の挙動を調べた。

図-2は、トンネル内空変位量 δ とトンネル外径 D との比率 $\varepsilon = \delta / D$ が9.5%の時の地山の変位分布を示したものである。図からもわかるように、斜面の下にトンネルを掘削した場合は、トンネルより山側に大きな変位領域が現れるのに対して谷側にはほとんど変位は現れず、谷側側壁より谷側の地山は動かないのが特徴となっている。また、変位ベクトルの方向はすべて山側から谷側に向かっており、地山がトンネルを山側から谷側へ押すように挙動していることがわかる。

次に、標点が代表する地山要素内でのひずみ分布は一様の仮定のもとで、得られた変位から求めた主ひずみ分布を ε が9.5%の場合について図-3に示す。図からわかるように、土被りが浅い斜面の下にトンネルを掘削した場合、トンネルに変形を許して行くと、トンネル谷側と山側の斜め上に地表面にまで達する傾斜した2本の帯状のひずみが集中した領域が現れるのが認められる。ちなみに、 ε を徐々に増加させていくと $\varepsilon = 3\%$ 程度からこのようなひずみの集中した領域が現れるのが認められた。これらひずみが集中した領域では変位が不連続となり、すべりが発生しているものと考えられ、トンネルには2本の帯状の領域に囲まれた部分の土塊が偏土圧として作用することになる。

3.2 縫地ボルトが地山の挙動に及ぼす効果

縫地ボルトの効果としては前述したように各種の効果が提唱されているが、対象となる地山の地質状態、地山の変形形態等によってその効果は異なるものと考えられる。上述したように土被りが浅い斜面形状の砂質地山にトンネルを掘削した場合、過大な変形をトンネルに許すとすべりが発生してトンネルに偏土圧が作用することになる。そこで、本研究では縫地ボルトがこのようなすべりに対して及ぼす効果をまずボルトの打設方向を変化させて調べてみることにした。

図-4～6は、長さ $L = 10\text{cm}$ のボルトを打設間隔 $d = 1.25\text{cm}$ で打設方向を変化させて打設した場合の変位分布、主ひずみ分布を示したものであり、 ε はいずれも9.5%の結果である。なお、ボルトの密度は原型に換算すると1本/ 1.6 m^2 となり、通常使用される密度の中でも比較的密な場合に相当する。

図からわかるようにボルトを鉛直に打設した場合あるいは地表面に垂直に打設した場合は、変位分布、主ひずみ分布ともボルトが無い場合との比較では明確な差は現れず、顕著なボルトの効果は認められない。

これらに対して、ボルトを水平に打設した場合は、変位分布についてはボルトが無い場合に比較して山側の変位領域が減少し、トンネル直上の変位ベクトルの向きが鉛直方向に近くなるなどの変化が認められる。主ひずみ分布についても、トンネル山側に現れるひずみの集中した領域の形状がトンネル直上からほぼ鉛直に伸びる形状となるなどの変化が認められる。ひずみの集中した領域に囲まれる部分の土塊がトンネルに土圧として作用すると考えると、水平に打設した場合はボルトが無い場合に比較するとトンネルに作用する土圧の大きさが軽減され、また、

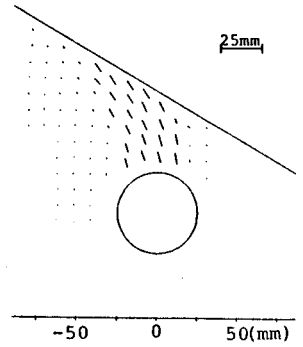


図-2 ボルトが無い場合の変位分布

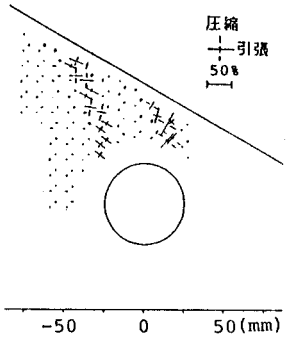


図-3 ボルトが無い場合の主ひずみ分布

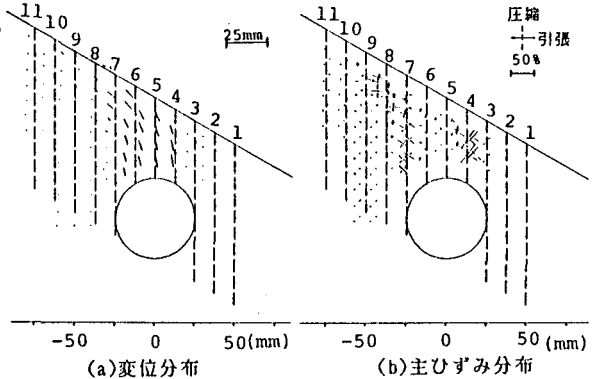


図-4 鉛直に打設した場合の結果

土圧の作用方向が鉛直に近い方向となるなどの効果が現れることになる。

以上のように、縫地ボルトにトンネル掘削に伴って地山に発生するすべりの抑制効果を期待する場合には、ボルトの打設方向としては水平に打設するのが最も有効であるものと考えられる。ボルトの効果としては、ボルトの引張抵抗により地山の強度が増加する考え方とボルトのせん断抵抗により地山の強度が増加する考え方に大別されるが、検討の対象としている変形レベルでは、すべり面で地山間にかなりの相対変位が発生していること、実験後の観察によれば図-6中のNO.1～6のボルトにかなりの残留曲げ変形が認められたことから、このケースではボルトのせん断抵抗が主として発

揮され、効果が現れたものと考えられる。ただし、このようなせん断抵抗はすべりに対するボルトの密度、ボルトの挿入の深さ影響を大きく受けるものと考えられ、水平に打設した場合でもボルトの密度が小さい場合あるいはボルトの長さが不十分な場合には、十分な効果が得られないケースが想定される。そこで、水平に打設する場合についてボルトの打設密度、ボルトの長さを変化させた実験を行い、その結果を $\epsilon = 9.5\%$ 時の主ひずみ分布について図-7(a)～(c)に示した。図-7(a)からわかるように、打設間隔が $d = 2.5\text{cm}$ の場合でもボルト長が $L = 10\text{cm}$ のものを使用する限りにおいては、主ひずみ分布は $d = 1.25\text{cm}$ 、 $L = 10\text{cm}$ の場合と同様の結果が得られており、かなりの効果が認められる。したがって、ボルトの長さが十分な場合にはボルトの密度をむやみに大きくすることはあまり効率的ではないと言える。しかし、図-7(b)に示されるように、ボルトに $L = 5\text{cm}$ のものを使用して打設間隔を $d = 2.5\text{cm}$ とした場合には、主ひずみ分布はボルトが無い場合とあまり変化が認められず、ほとんど効果はない。これは、トンネル直上山側に

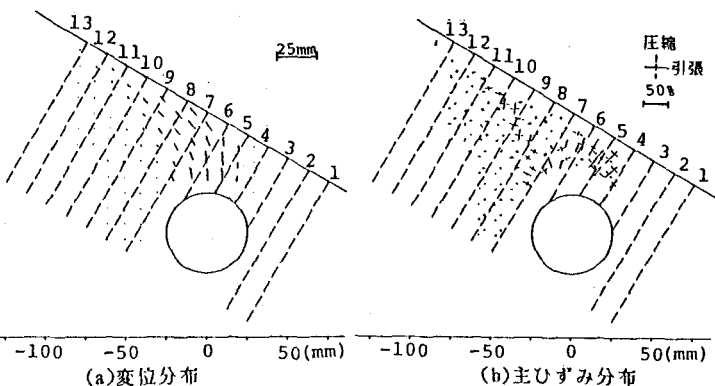


図-5 地表面に垂直に打設した場合の結果

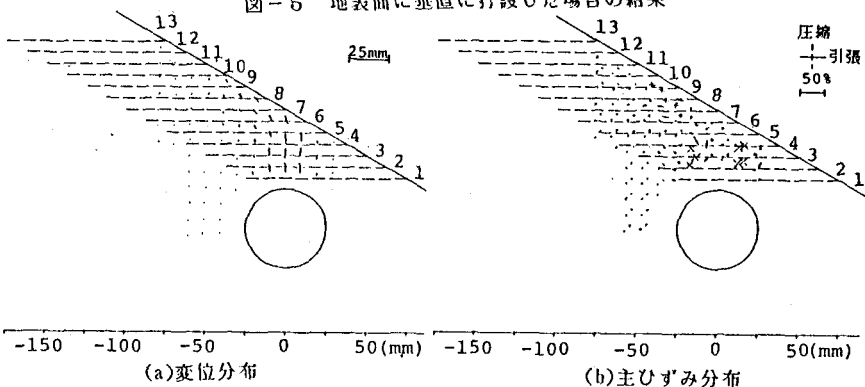


図-6 水平に打設した場合の結果

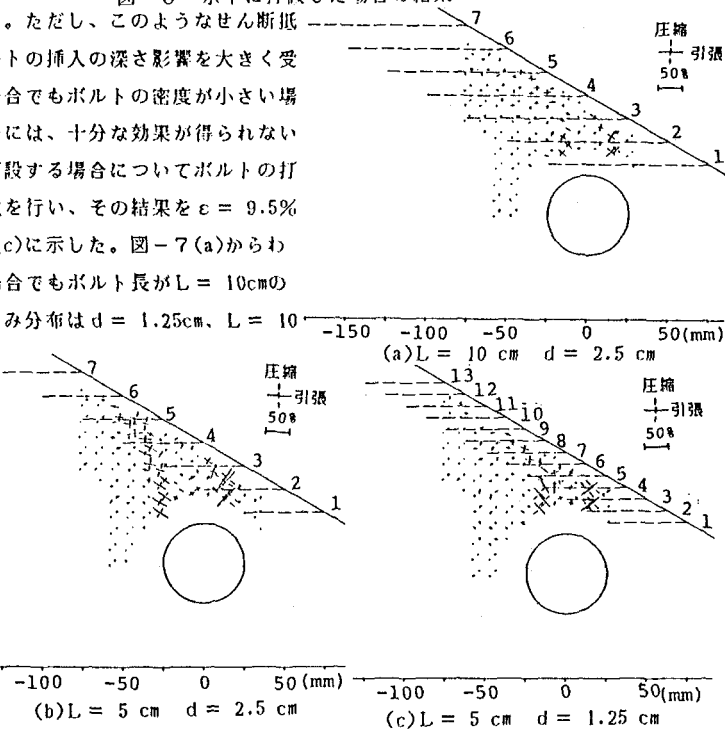


図-7 水平に打設した場合のボルト長、密度の影響

発生するすべりに対してボルト長が不十分であるため十分なせん断抵抗が発揮されなかったものと考えられ、効果が発揮されるには少なくともすべり面に達するまでのボルト長が必要であると判断される。ただし、図-7(c)に示すようにボルトに $L = 5\text{cm}$ のものを使用しても打設間隔が $d = 1.25\text{cm}$ の場合にはかなりの効果が認められており、打設密度を大きくすることによりボルト長の不足に起因するせん断抵抗の不足分をある程度補うことは可能であるものと考えられる。

なお、地表面に垂直に打設した場合には顕著な効果は認められなかったが、実験後の観察によれば図-5中の NO.5.7.8.9のボルトにはやはりかなりの残留曲げ変形が認められた。したがって、このケースもボルトの打設方向としてはある程度のせん断抵抗が発揮される角度になっているものと考えられる。そこで、ボルトに曲げ剛性の非常に大きいアルミ板を使用した場合の実験を行い、その時の主ひずみ分布 ($\varepsilon = 9.5\%$ 時) を図-8に示した。図からわかるように山側に発生するひずみがかなり分散されているのが認められる。ボルトの形状の違いによる影響も多少考えられるが、地表面に垂直に打設した場合でもボルトに曲げ剛性の非常に大きいものを使用した場合には効果が現れるといえよう。

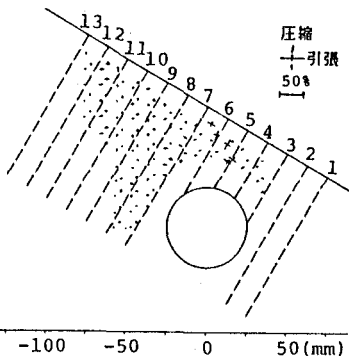


図-8 地表面に垂直に打設した場合のボルトの曲げ剛性の影響

一方、ボルトを鉛直に打設した場合も効果が認められなかったが、実験後の観察でもボルトにはほとんど残留曲げ変形は認められず、このケースのようにボルトの打設方向とすべりの発生する方向が比較的近い場合にはボルトのせん断抵抗は発揮されにくいものと考えられる。ちなみに、図-9はボルトにアルミ板を使用した場合の主ひずみ分布 ($\varepsilon = 9.5\%$ 時) を示したものである。トンネル直上山側の部分のひずみが若干分散されているのが認められるが、地表面に垂直した場合と比較すると曲げ剛性の増加による効果の向上は小さいことがわかる。

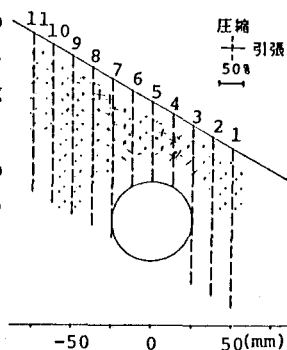


図-9 鉛直に打設した場合のボルトの曲げ剛性の影響

4. 結 論

本研究で明らかになった点をとりまとめると以下のようなものである。

- 1) 土被りが浅い砂質地盤の斜面上にトンネルを掘削した場合、山側に大きな変位領域が現れるのに対してトンネルより谷側の地山はほとんど変位しない。
- 2) 土被りが浅い砂質地盤の斜面上にトンネルを掘削した場合、トンネルに変形を許して行くとトンネルの山側と谷側にひずみの集中した帯状の領域が形成される。この帯状の領域は、トンネルの変形量の増加とともに地表面まで達するようになり、帯状領域に囲まれた土塊がトンネル方向に変位することによりトンネルには偏土圧が作用することになる。
- 3) 斜面上にトンネルを掘削する場合に使用される縫地ボルトの効果として、トンネルに過大变形を許した場合に発生するすべりに対する抑制効果を期待する場合には、適度の長さで本数のボルトを水平に打設するのが効果的である。地表面に垂直に打設した場合には、曲げ剛性の非常に大きいものを使用した場合には効果が現れる。また、鉛直に打設した場合には、曲げ剛性の非常に大きいものを使用した場合でも効果の向上は小さい。

なお、本研究は地質状態、地形状態が非常に限られた場合の、しかもトンネルに過大な変形を許した場合の地山の变形抑制効果についての検討を加えたものである。したがって、地質条件、地形条件、トンネルの变形状態等が異なれば期待できるボルトの効果も異なる。施工性等を考えれば、現在のところボルトを鉛直に打設するのが一般となっているが、今後、地質条件が異なった場合やトンネルの变形レベルが小さい段階での鉛直に打設されるボルトの効果について、検討を加えて行きたいと考えている。

(47) Effect of rock bolts on the stability of a tunnel in slope

Hideto Mashimo

Toshiaki Ishimura

Public Works Research Institute

Ministry of Construction

Summary

Recently, many shallow tunnels have been excavated in slope and in these cases rock bolts installed from the ground surface are often used for the stability of tunnels.

A series of centrifugal model tests was performed to investigate ground movement around a shallow tunnel in sandy slope and the effect of rock bolts on the stability of a tunnel.

The results obtained here are summarized as follows.

- 1) With an increase of the tunnel deformation, a couple of slip lines have been developed in the ground, so the unsymmetrical pressure may act on the tunnel from the hill side.
- 2) Installing rock bolts from the ground surface in horizontal direction is effective to reduce ground movement around a tunnel.