

土被りの浅い砂質地山トンネルの補助工法に関する模型試験

MODEL TEST ON PREREINFORCEMENT OF SHALLOW TUNNEL IN SANDY GROUND

福島伸二*・望月美登志**・香川和夫**・横山 章***

By Shinji FUKUSHIMA, Yoshitoshi MOCHIZUKI, Kazuo KAGAWA and Akira YOKOYAMA

In order to excavate a shallow tunnel in sandy ground, it is necessary to stabilize the ground surrounding the opening and prevent a surface settlement. For the purpose, an appropriate prereinforcement should be applied to improve the ground conditions. However, it has not been fully clarified an effect and a reinforcing mechanism of the prereinforcement method. In this paper, a series of model tests was performed on sandy ground to investigate the reinforcing mechanism of prereinforcement method using steel bolts. It was found the following from the model tests.

(1) The reinforcing mechanism of bolting reinforcement is the restraint of deformation of ground by the frictional force generated between the soil and steel bolt placed in the ground.

(2) If the bolts were placed in the direction of the minimum principal strain, the effect of preventing the deformation is most effective.

Keywords: tunnel, prereinforcement, model test, sandy ground

1. ま え が き

都市部におけるトンネル掘削の特徴は土被りが浅いこと、地山が砂質土のような未固結な地盤であること、さらに地表面上には住宅、事務所などの構造物があることである。このような土被りの浅い未固結地山をNATM工法で掘削するには切羽周辺の地山を安定させ地表面の沈下を最小限に抑える必要があり、このためには事前に適切な補助工法を施工して安全に掘削できるような状態に地山を補強しなければならない。ここでいう補助工法は通常の施工法で採用される機械設備で対処し得るボルト、鋼矢板などを用いた切羽の天端部および鏡部の安定を目的とした地山の補強法であるが、この補助工法の地山補強メカニズムやその効果についてはまだ不明な点が多く、また設計法も確立していないのが現状である。

砂質地山トンネルの挙動についての研究としては、村山、松岡^{1),2)}のアルミ棒積層体により地山をモデル化した沈下床の実験がある。これにより沈下床とともに降下するほぼアーチ形状の領域があること、またこの形状が

広がりつつゆるみが上方に伝達されこのアーチの先端が地表面に達するとゆるみ領域の幅はそれ以上広がらないことが明らかになった。また足立、田村、八嶋、上野³⁾はトンネル掘削による周辺地山への影響を調べるために、トンネル横断面をモデル化したアルミ棒積層体地山と直径可変のモデルトンネルを用いた模型試験を実施している。その結果、被りが浅いと地表面まで大きな変位が生じるが被りが深くなるとグランドアーチの形成により大きな変位を示す領域が縮小していくこと、また浅いトンネルと深いトンネルの区別は土被り(H)とトンネル径(D)の比でほぼ $H/D=2\sim3$ の間に境界がありそうなことを明らかにした。これらの研究はトンネルの地山の横断面の挙動を扱っていること、アルミ棒積層体地山としていることに特徴がある。しかし切羽周辺の挙動を調べるためにはトンネル縦断方向について考える必要があること、また補助工法の地山補強メカニズムやその効果を調べるにはアルミ棒積層体でモデル化した地山では問題があるように考えられる。

そこで本研究では切羽の安定化、地表面沈下防止のために都市NATMで採用されるボルトを用いた補助工法の地山補強メカニズムとその効果を調べるために、地山材料として乾燥砂を用いてトンネル縦断部をモデル化した模型試験を実施した。この模型試験の特徴は土被りが

* 正会員 工博 フジタ工業(株)技術研究所
(〒223 横浜市港北区大綱町74)

** 正会員 工修 フジタ工業(株)技術研究所(同上)

*** 正会員 工博 フジタ工業(株)土木本部
(〒151 渋谷区千駄ヶ谷4-6-15)

非常に浅いトンネルを想定していること ($H/D=1.0$ で、これは足立ら³⁾の分類では浅いトンネルになる)、補助工法の効果を調べるためにある程度大きい模型(模型でトンネルの直径に相当するものが $D=50\text{ cm}$)としていることである。

2. 縦断トンネル土槽試験装置と試験方法

使用した縦断トンネル土槽は図-1に示すようにトンネル切羽周辺の縦断部分を二次元的にモデル化したものである。トンネル部分は長さ 50 cm 、幅 30 cm 、高さ 50 cm のアクリル製の箱でモデル化した。モデルトンネルの高さ 50 cm は実際のトンネルでは掘削断面の直径あるいは高さに相当するので、ここではこれをトンネル断面の直径 D と表示することにする。このトンネルは土槽側面に取り付けられ、上・下面をガイド板とフラットベアリングにより水平横方向のみに動くようにガイドされている。

この土槽では、トンネル先端面を図-1に示すようにガイド板(長さ 25 cm)の先端から 5 cm だけ出しておき、トンネル箱を水平方向に $L=5, 10, 20, 30, 40, 50\text{ mm}$ と段階的に引き抜いてトンネル掘削状態を再現している。

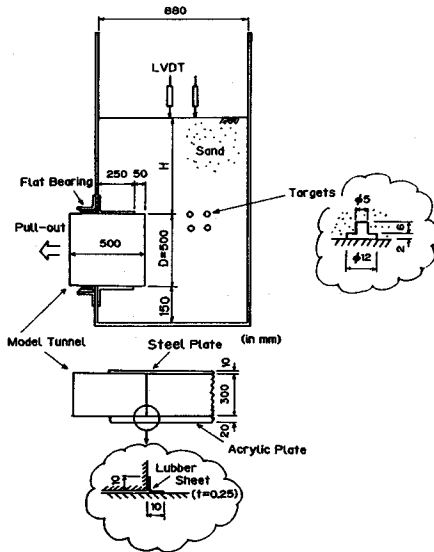


図-1 縦断トンネル土槽試験装置

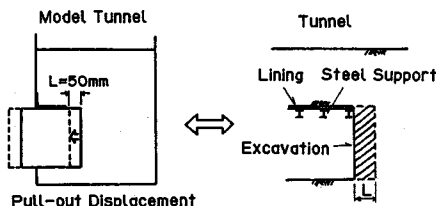


図-2 模型試験によるトンネル掘削の再現

る。この試験では地中の変位を把握するために実際には発生しないような大きな変形を地山に与えている。大変形時の挙動は小変形時の挙動の延長上にあると考えられるので、このような大変形を許す試験であっても実際の地山挙動を推定することは十分可能であろう。このトンネル引抜きは実際のトンネル掘削で考えると図-2に示すように1区間だけ無支保状態で掘削を進めることに相当しよう。試験に使用した地山材料は浜岡砂で、この材料の物理的特性と粒度曲線を図-3(a)に示してある。図中には比較のために豊浦砂の粒度曲線も示してある。浜岡砂の強度特性は三軸圧縮試験(飽和排水条件)により調べた。模型試験では地山の対象となる拘束圧領域が低いことを考えて、試験は拘束圧 $\sigma_c = \sigma_3 = 0.05 \sim 0.21\text{ kgf/cm}^2$ において実施した。試験結果を図-3(b)に示してあるが、図中の内部摩擦角 ϕ は粘着力成分を0として

$$\phi = \sin^{-1}((\sigma_1 - \sigma_3)_{\max} / (\sigma_1 + \sigma_3)_{\max})$$

より計算した。この図から拘束圧 $\sigma_3 = 0.05 \sim 0.20\text{ kgf/cm}^2$ の範囲では ϕ は拘束圧によらずほとんど一定であることがわかる。

模型地山は空気乾燥状態にある砂を出口寸法が $3\text{ mm} \times 280\text{ mm}$ のホッパーから高さ約 80 cm で自由落下させ

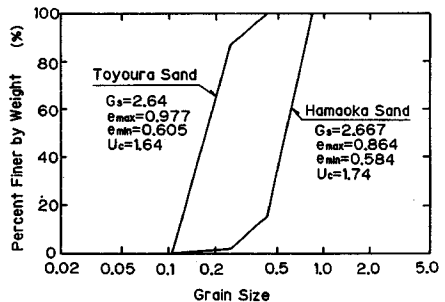


図-3(a) 地山材料の粒度曲線と物理的特性

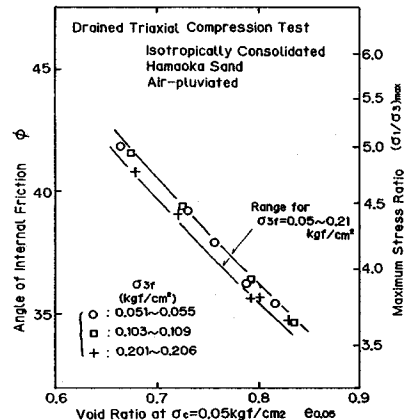


図-3(b) 地山材料の三軸圧縮試験結果

て作製した。このときの地山の密度は $\rho_d = 1.50 \sim 1.52 \text{ g/cm}^3$ ($e = 0.75 \sim 0.78$) である。このように砂を自由落下させて堆積させると、構造異方性のある地山になるものと考えられる。模型地山を製作するときには地中変位を測定するために図-1に示したように標点をほぼ $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ の格子状に配置した。この標点は地山の変位とともに移動するようにジュラルミンで作製したものである。地中変位はモデルトンネルを階段的に引き抜いたときの標点の移動を写真撮影し、写真上の標点の位置をデジタイザーで読み取ることにより測定した。地山の地表面沈下は約 10 cm 間隔で設置した変位計により測定した。また地山の地中変位の状況が目視できるように 10 cm 層厚ごとに赤いチョークの粉を混ぜた砂の薄層をおいた。

本研究では地山材料として乾燥砂を使用しているが、これは以下の理由による。砂質地山中の都市トンネルは地下水位を低下させ地山を不飽和状態にして掘削される。このため、砂質土であっても不飽和状態でのサクションにより小さいながらも見掛けの粘着力が存在し、地山強度 (τ_f) は粘着力成分 (c) と摩擦成分 ($\sigma \tan \phi$) から成る ($\tau_f = c + \sigma \tan \phi$)。模型試験において実物と同じ材料をそのまま使用すると、模型地山はその縮尺に応じて拘束圧が小さくなるので地山の全強度成分のうち占める摩擦成分が小さくなり粘着力成分の占める割合が相対的に大きい地山に、つまり砂質地山というより粘性土に近い地山に相当することになってしまう。したがって、

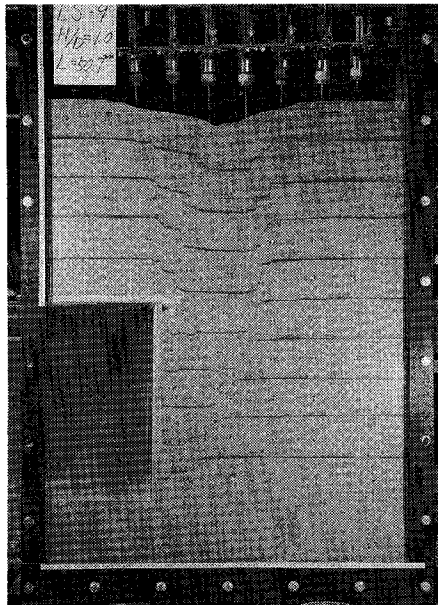


写真-1 地山の変形状況 ($H/D=1.0$, $L=50 \text{ mm}$)

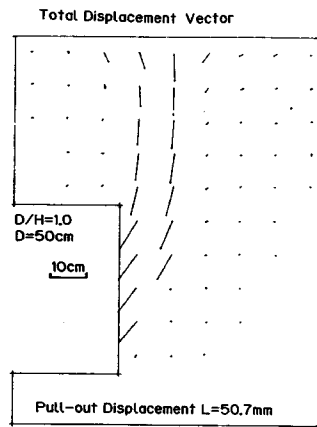


図-4 地中変位ベクトル ($L=50 \text{ mm}$)

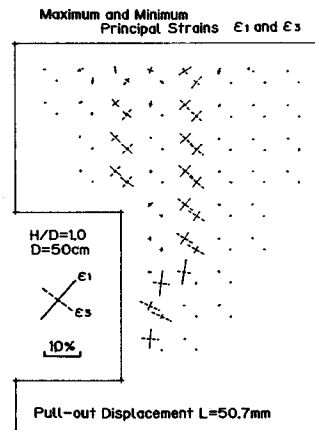


図-5 最大・最小主ひずみの大きさと方向

模型試験では粘着力成分のない乾燥砂を使用する方が実際の地山状況をモデル化できるものと考えられる。

3. トンネル掘削が周辺地山に及ぼす影響

写真-1に土被り H とトンネルの直径 D が同じ $H/D=1.0$ の場合にトンネルを $L=50 \text{ mm}$ だけ引き抜いたときの地山の変形状況を示している。図-4には写真-1から読み取った地中変位をベクトルで示してある。これらの写真とベクトル図からトンネルを引き抜くことにより生じた地中変位はある領域に限られ、明確なすべり線により変形部分と未変形部分とに分けられていることがわかる。また地中変位は本試験のように土被りが小さいとグラウンドアーチが形成されず切羽の変位がそのまま地表面に伝達されることがわかる。

図-5には図-4の地中変位から計算した最大主ひずみ (ϵ_1) と最小主ひずみ (ϵ_3) の大きさと方向を示してある。この図からひずみはすべり線部分に集中して生じているだけですべり線に囲まれた部分はほとんどひずみは

生じていないこと、つまりすべり線に囲まれた部分はほとんど変形せず、そのまま切羽部に向かってすべり落ちていることがわかる。また地山が伸び変形をしている方向（ ϵ_3 方向：土は伸び変形に対して弱い材料であるから特にこの方向に着目する）をみると、切羽上部の地山は斜め方向に伸びているが、切羽前上部ではほぼ水平方向に伸びていることがわかる。

4. 補助工法の地山補強メカニズム

(1) ボルトを使用した補助工法のモデル化

ボルトを使用した補助工法の地山補強メカニズムを調べるために、以下に示すように斜めボルト工法、鏡止めボルト工法、縫地ボルト工法の3種類についてモデル化した。

a) 斜めボルト工法ボルト

補強材として直径2mmの針金に砂粒子を付着させ、これを図-6に示すようにある一定間隔(Δw)で支保工代わりのガイド板先端に固定し、角度(θ)を変えて斜め

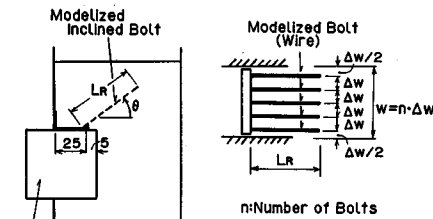


図-6 モデル化した斜めボルト工法

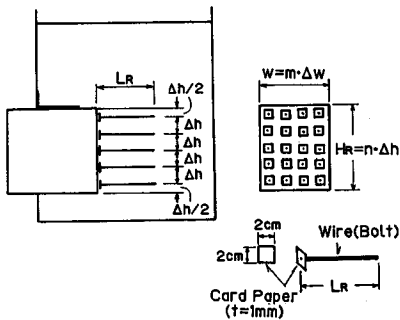


図-7 モデル化した鏡止めボルト工法

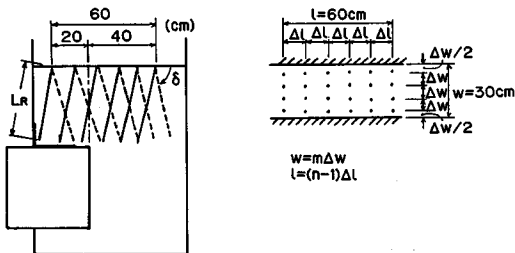


図-8 モデル化した縫地ボルト工法

方向に打設した。

b) 鏡止めボルト工法

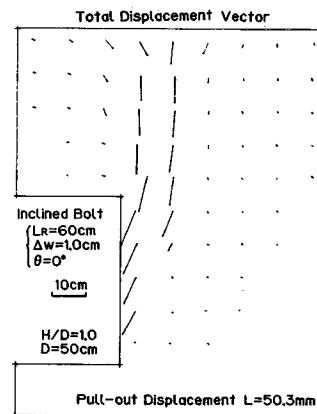
補強材は図-7に示すように直径2mmの針金に砂粒子を付着させて、この一端にベアリングプレートをモデル化した一辺2cmの正方形のボール紙(厚さ1mm)を付けて作製した。これをモデルトンネルの鏡面に一定間隔($\Delta w \times \Delta h$)で水平に打設した。

c) 縫地ボルト工法

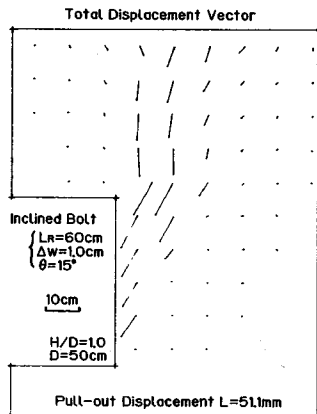
補強材は直径2mmの針金に砂粒子を付着させ、これを長さ50cmにして図-8に示すように地表面から一定間隔($\Delta l \times \Delta w$)でトンネル切羽面の前後20cm、40cmの範囲に鉛直あるいは斜め方向に打設した。

(2) 斜めボルト工法の効果

図-9(a)~(d)に長さ $L_R=60$ cmの補強材を、間隔 $\Delta w=1.0$ cmで角度 $\theta=0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ と変えて打設して、トンネルを $L=50$ mmだけ引き抜いたときに生じた地中変位ベクトルを示してある。これらより、ボルトを打設したことにより地山の変位状況にかなりの差が

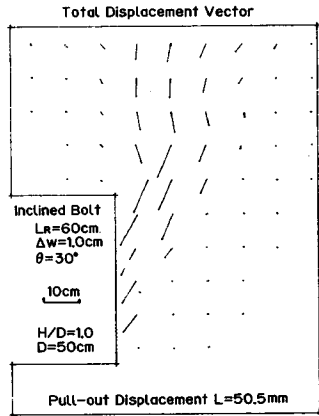


(a) $\theta=0^\circ$

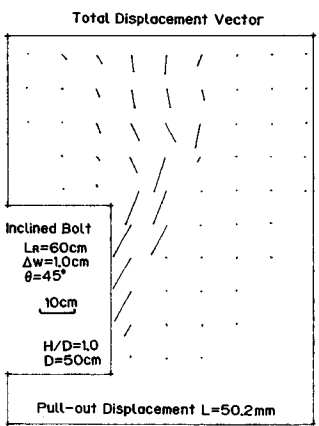


(b) $\theta=15^\circ$

図-9 地中変位ベクトル(斜めボルト, $L_R=60$ cm)



(c) $\theta=30^\circ$



(d) $\theta=45^\circ$

図9 地中変位ベクトル (斜めボルト, $L_R=60$ cm)

生じ、変位領域が広がることわかる。また図10(a)にはトンネル引抜きに伴う地表面沈下を示してある。これらの図から補強材を水平に打設しても地中変位防止、地表面沈下防止にはほとんど効果はないが、斜め方向に打設すれば効果的であることがわかる。また $\theta=15\sim 30^\circ$ の範囲に最も効果の大きい打設角度があるようである。砂粒子を付着させてない針金と、付着させてある針金をそれぞれ角度 $\theta=30^\circ$ 、間隔 $\Delta w=1$ cmで打設したときの試験結果を図10(b)に示してある。この図から砂粒子が付着してない針金は、全く効果がないわけではないが、その効果は砂粒子が付着している針金に比べてかなり小さいことがわかる。このことはボルトによる地山の補強効果にボルトと地山との摩擦が重要な役割を果たしていることを示しているといえる。図11には補強材長さの影響を調べるために、角度 $\theta=30^\circ$ で長さを $L_R=15, 30, 60$ cmと変えて補強材を打設したときのトンネル引抜きに伴う地表面沈下を示してある。この図から補強材長さが大きいほど地表面沈下防止に効果的で

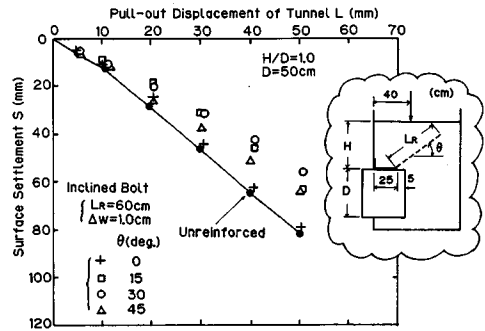


図10(a) トンネル引抜きに伴う地表面沈下 (斜めボルト, $L_R=60$ cm)

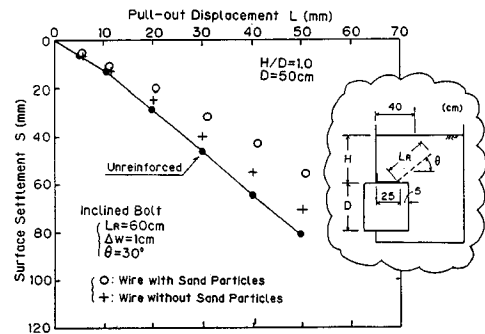


図10(b) トンネル引抜きに伴う地表面沈下 (ボルトの摩擦の影響)

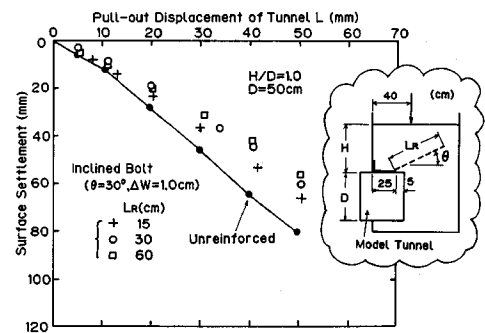
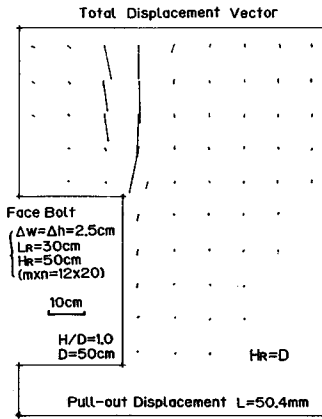


図11 トンネル引抜きに伴う地表面沈下 (斜めボルト, $\theta=30^\circ$)

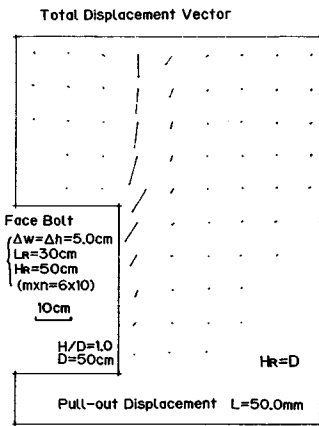
あるが、この長さの影響は補強材角度の影響ほど大きくはなく補強材の打設角度の方がより重要な要素であることがわかる。

以上のように、斜め方向に打設した補強材が地中変位、地表面沈下を小さくするのに効果があることと図5に示したようにトンネル上方部の地山が伸びていることは無関係ではないだろう。つまり地山が伸び変形をする方向に補強材を打設すると、補強材と地山との相対変位が大きいため両者に働く摩擦力が最も大きくボルトが地山の伸び変形を効果的に拘束するものと考えられる。

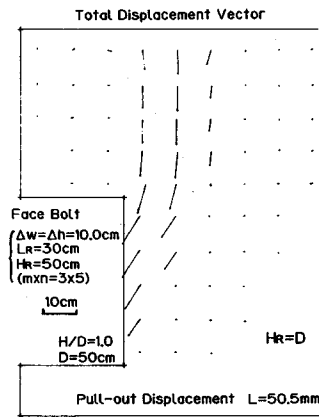
ボルトのような補強材をすべり線を横切るように打設



(a) $\Delta w = \Delta h = 2.5$ cm



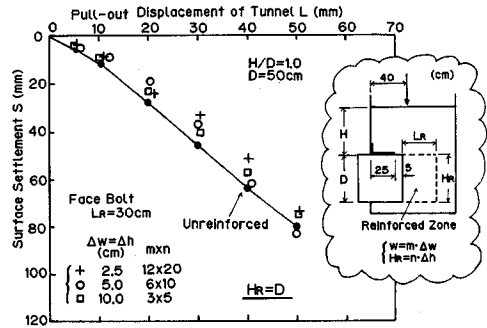
(b) $\Delta w = \Delta h = 5.0$ cm



(c) $\Delta w = \Delta h = 10.0$ cm

図—12 地中変位ベクトル (鏡止めボルト, $H_R = D$)

したときにはボルト自身の剛性による補強効果も考えられるが、図—10(a)にあるように補強材が地山が伸びる方向ではなく、すべり線を横切るように打設した角度 $\theta = 0^\circ$ の場合にほとんど効果がないことから、ボルトの



図—13 トンネル引抜きに伴う地表面沈下 (鏡止めボルト, $H_R = D$)

剛性による効果は小さいといえよう。

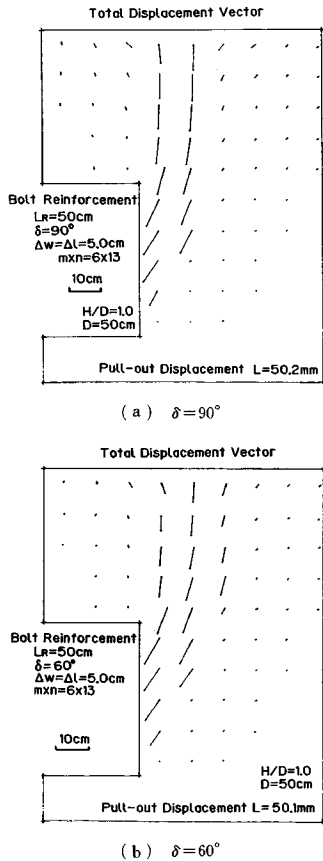
(3) 鏡止めボルト工法の効果

図—12(a)~(c)に鏡部全面 ($H_R = D$)に長さ $L_R = 30$ cmの補強材を間隔を $\Delta w = \Delta h = 2.5, 5.0, 10.0$ cmと変えて打設して、トンネルを $L = 50$ mmだけ引き抜いたときの地中変位ベクトルを示してある。これらの図から鏡止めボルトにより鏡部の変形は小さくなっていること、鏡部の安定にこの種のボルトが非常に効果的であることがわかる。特に補強材間隔の小さい $\Delta w = \Delta h = 2.5$ cmと5.0 cmの場合にはそうである。ただし、鏡部の変形が小さいのでトンネル引抜きにより生じた空間を埋めるように天端部の地山がこの部分に変位し、天端部に局部的に大きな変位が生じている。このことはトンネル引抜きに伴う地表面沈下を示す図—13からもわかり、必ずしも鏡止めボルトによる鏡部の安定がそのまま地表面沈下防止につながらないようである。実際のトンネルではこのような大変形を与えることなく支保を施しながら掘削するので、ここでみられるような局部的な沈下現象は生じないように考えられる。むしろ鏡部の安定にこの種のボルトの打設が非常に有効であることに注目すべきであろう。

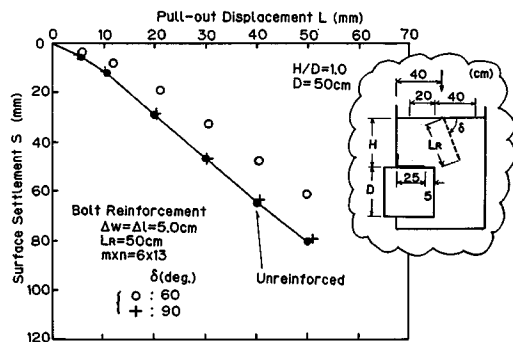
以上のように水平方向に打設した鏡止めボルトが鏡部の安定に効果的なのは、図—5に示したように鏡部の伸び変形の方向がほぼ水平であるからこの方向にボルトを打設するとボルトと地山との間に生じる摩擦力が最も大きく、ボルトにより地山の変形が拘束されるためと考えられる。

(4) 縫地ボルト

図—14(a), (b)に角度を $\delta = 90^\circ$ と 60° と変えて補強材を打設したときの地中変位ベクトルを示してある。また図—15にはトンネル引抜きに伴う地表面沈下を示してある。これらの図から鉛直方向に打設した縫地ボルトはほとんど効果はないが、斜めに打設した場合には地中変位、地表面沈下を小さくする効果があることがわかる。



図—14 地中変位ベクトル (縫地ボルト, $L_R=50\text{ cm}$)



図—15 トンネル引抜きに伴う地表面沈下 (縫地ボルト, $L_R=50\text{ cm}$)

これは斜めボルトと同様に、切羽上方部の地山の斜め方向の伸び変形をボルトが地山との摩擦により拘束するためと考えられる。

5. ボルトの効果

以上のようにボルトを使用した補助工法はボルトを地山が伸び変形をする方向に打設すると地山の補強に効果的であることがわかった。このボルトによる補助効果は

ボルトと地山との摩擦による地山の伸び変形の拘束によるものであるが、これは補強土の引張補強材による補強原理⁴⁾と同じである。つまり地山内に何も無いときに生じる最小主ひずみ (ϵ_3) 方向にボルトを打設すると最も補強効果が大きく、この場合にはボルトには引張力のみが作用する。ここではこのボルトの効果の意味について考えてみる。

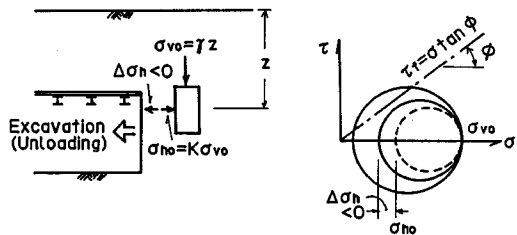
トンネルを掘削することは、その地山中の応力を解放すること、つまり地山に除荷の応力変化を与えることに相当しよう (図—16)。このとき地山の伸び変形方向に (最小主ひずみ ϵ_3 方向) に打設されたボルトの効果はボルトを含む地山要素から考えてみる。図—17 に示すように地山要素 (abcd) に作用する応力のうち、ボルトも含めた要素全体に作用する平均的な応力 (σ_{1av} , σ_{3av}) と、ボルト付近に作用する部分的な応力 (σ_{1e} , σ_{3e}) とに分けて考える。ボルトは最小主応力方向に打設されているので、地山との摩擦によりボルトには引張力 T が作用しこの方向の変形を拘束するので、この方向のボルト付近の応力 σ_{3e} は要素の平均的な応力 σ_{3av} とは等しくならない。一方、これと直交する方向ではボルトにより拘束されないのでこの方向の応力、すなわち最大主応力はボルトによりなら影響を受けないので平均的応力と部分的な応力とは互いに等しく、

$$\sigma_{1av} = \sigma_{1e}, \quad \sigma_{3av} \neq \sigma_{3e} \dots \dots \dots (1)$$

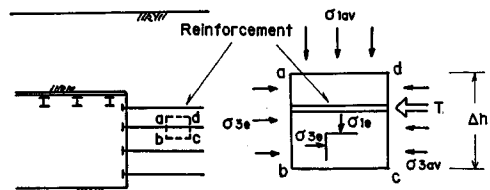
である。図—17 から地山要素に外部より加わるのは平均的な応力とボルトによる引張力で、これにつり合う部分的な応力との水平方向の力のつり合いを考えると、 $\sigma_{3e}\Delta h = \sigma_{3av}\Delta h + T$ となるから、

$$\sigma_{3av} = \sigma_{3e} - T/\Delta h \dots \dots \dots (2)$$

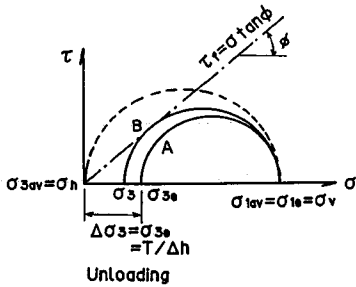
が得られる。トンネルを掘削することは切羽の平均的な



図—16 トンネル掘削による応力変化



図—17 地山要素の応力状態



図一18 地山要素のトンネル掘削による応力変化

最小主応力を $\sigma_{3av} = \sigma_h \rightarrow 0$ にすることに相当するが、このときの平均的な応力の変化を Mohr の応力円で表わすと図一18の点線の円になる。またボルト周辺の部分的な応力は式(2)から

$$\sigma_{3e} = T/\Delta h \dots\dots\dots (3)$$

となり、ボルトと地山との摩擦により見掛け上拘束圧が増加していることになり、この場合の Mohr 円は円Aになる。これより平均的な応力では Mohr 円が破壊包絡線を越えて破壊状態になっているが、ボルト周辺の部分的な応力状態はボルトと地山の摩擦に起因する見掛けの拘束圧の増加 ($\Delta\sigma_3 = \sigma_{3e} = T/\Delta h$) により必ずしも破壊状態になっていない。つまり地山応力の Mohr 円(円B)が破壊包絡線に接するときの条件(破壊条件)

$$R_r = \sigma_1/\sigma_3 (= (1 + \sin \phi)/(1 - \sin \phi))$$

より求まる $\sigma_3 = \sigma_{1av}/R_r$ よりも、見掛けの拘束圧の増加分 $\Delta\sigma_3 = \sigma_{3e} = T/\Delta h$ が大きく

$$\Delta\sigma_3 > \sigma_3 \dots\dots\dots (4)$$

であれば破壊状態にならず地山は安定していることになる。このように補助工法のボルトは周辺地山との摩擦により見掛け上の拘束圧を増加させる効果をもっており、このためボルト周辺の地山は剛性が大きくなり一体化したようになるものと考えられる。

6. 結 論

未固結な砂質地山を都市 NATM でトンネルを掘削するときに切羽の安定化、地表面沈下防止のために採用さ

れる、ボルトを用いた補助工法の地山補強メカニズムとその効果を土被りが非常に浅いトンネル ($H/D=1.0$) を想定した模型試験により調べた結果以下のことがわかった。

(1) トンネル引抜きにより切羽周辺の地山の破壊は局部的に生じ、すべり線により変形部分と未変形部分に明確に分けられる。そしてすべり線に囲まれた部分はほとんど変形せずにそのまま切羽に向かってすべり落ちている。

(2) トンネル引抜きによる地山の伸び変形をする方向をみると、切羽上方部分は斜め方向に伸びているが、切羽前方部分(鏡部)はほぼ水平方向に伸びる傾向にある。

(3) ボルトを使用した補助工法は、ボルトの打設をする方向により効果が大きく異なり、地山が伸び変形をする方向に打設すると効果的である。このボルトによる補強効果はボルトと地山との間に発生する摩擦による地山の伸び変形の拘束によるものである。

ここでは地山にかなりの変形を許して地山が崩壊状態にあるような場合を想定した試験となっている。この状態が砂質地山のトンネル掘削の状況を完全に再現してはいないが、ボルトを用いた補助工法の基本的な地山補強メカニズムは調べられたように考えている。

参 考 文 献

- 1) 村山朗郎・松岡 元：粒状土地盤の局部沈下現象について、土木学会論文報告集，第172号，pp.31~41，1969.
- 2) 村山朗郎・松岡 元：砂質土中のトンネル土圧に関する基礎的研究，土木学会論文報告集，第187号，pp.95~108，1971.
- 3) 足立紀尚・田村 武・八嶋 厚・上野 洋：砂質地山トンネルの挙動と解析に関する研究，土木学会論文集，第356号，Ⅲ-3，pp.129~136，1985.
- 4) 龍岡文夫・金藤浩司・三木五三郎・生原 修・浜田英治・佐藤剛司：引張り補強材による砂の補強についての基礎的研究，土と基礎，Vol.31，No.9，pp.11~19，1983. (1988.6.10・受付)