

(66) 土被りの浅い砂質地山トンネルにおける補助工法の補強メカニズム

フジタ工業（株）技術研究所 正会員 望月 美登志 福島 伸二
同 上 同 上 香川 和夫

The Reinforcing Mechanism of Prereinforcement method on Shallow Sandy Ground Tunnel

Yoshitoshi Mochizuki, Shinji Fukushima, Fujita Corporation
Kazuo Kagawa, Fujita Corporation

Abstract

In the case to apply NATM to shallow sandy ground tunnel, 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 condition.

However it has not been fully clarified an effect and a reinforcing mechanism of 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. The results of model tests are given below.

- (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.

1 まえがき

都市部におけるトンネル掘削の特徴は、地山が未固結であり、土被りが浅く、地表には構造物があることである。このような土被りが浅い未固結地山にNATM工法を適用する場合、切羽の自立性や構造物に影響を及ぼす地表面沈下などが問題となる。そこで本研究は切羽の安定や地表面沈下を防止するために採用されるボルトを用いた補助工法（斜めボルト、鏡止めボルト、縫地ボルト）の地山補強メカニズムとその効果について二次元縦断土槽を用いた模型試験により調べた結果を報告するものである。

2 試験方法

実験に用いた土槽は図-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長さ88cm、幅30cm、高さ191cmの土槽で、直方体のアクリルの箱（長さ50cm、幅30cm、高さ50cm）を後方に引き抜くことでトンネル掘削を再現している。モデルトンネルの高さ50cmは実際のトンネルでは直径Dに相当するので、これをトンネル断面の直径Dと表示し、本実験においてはトンネル高さ（径）Dと土被りHの比 $H/D=1.0$ で一定としている。地山材料は遠州浜岡砂（ $G_s=2.667$, $e_{max}=0.864$, $e_{min}=0.584$, $U_c=1.74$, $D_{50}=0.56mm$ ）である。模型地山は空気乾燥状態の砂を出口寸法が $280mm \times 3mm$ のホッパーから高さ80cmで雨を

をふらすように自由落下させて作製した。この時、地中変位を測定するために図-1に示すようなターゲット（ジュラルミン製）をほぼ10cm*10cmメッシュで配置した。地中変位はトンネルを段階的に引き抜いた時のターゲットの移動を写真撮影し、これをデジタイザーで読み取って測定した。地表面の沈下は約10cm間隔で設置した変位計により測定した。また地山の変位状況が目視できるように赤チョークの粉を付けた砂の薄い層を置いた。

3 トンネル掘削時における周辺地山の挙動

図-2にモデルトンネルを $L=50\text{mm}$ 引き抜いた時の切羽周辺の地中の変位ベクトルを示している。これらの図から、トンネルを引き抜くことにより生じる地中の変位はある領域に限られ、変形する部分とほとんど変形しない部分があること、変形している部分では切羽から地表面に行くに従い変形は鉛直方向の成分が卓越していることがわかる。

図-3には図-2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に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にそのまま切羽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)を見ると、切羽上方部の地山は斜め方向に伸びているが、切羽前方部ではほぼ水平方向に伸びていることがわかる。

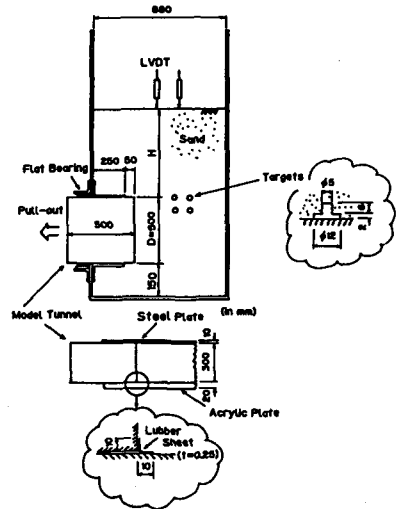


図-1 縦断トンネル土槽試験装置

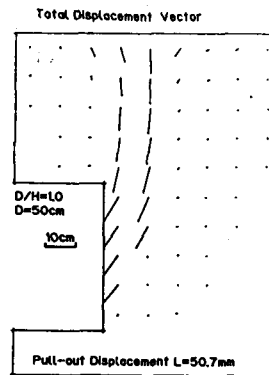


図-2

地中変位ベクトル

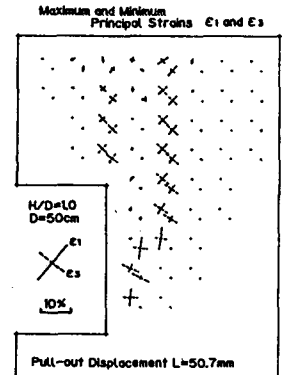


図-3

最大最小主ひずみの大きさと方向

4 ボルト系補助工法の補強メカニズム

4.1 ボルト系補助工法のモデル化

本研究に用いたボルト系補助工法は3種類で以下に示す方法でモデル化を行なっている。

(1) 斜めボルト：直径 $d=2\text{mm}$ 、長さ $L_R=15, 30, 60\text{cm}$ の針金の表面にアルダイトで砂を付着させ、これを図-4(a)に示すように一定間隔 $\Delta w=1.0\text{cm}$ ($n=30$ 本)で支保工代りのガイド板先端に固定し、トンネル切羽より5cm手前の天端部に水平方向から角度 $\theta=0, 15, 30, 45^\circ$ 方向に配置させたもの。

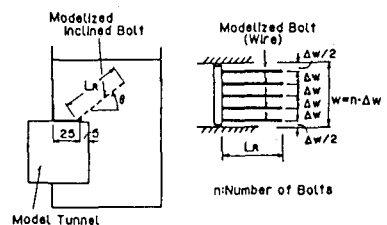


図-4(a)

モデル化した斜めボルト工法

(2) 鏡止めボルト：表面にアルダイトで砂を付着させた直径 $d=2\text{mm}$ 、長さ $L_R=30\text{cm}$ の針金の一端にベアリングプレートを模した $2\text{cm} \times 2\text{cm}$ のボール紙を固定し、これをトンネル切羽部分に均等

な間隔 ($\Delta w = \Delta h = 2.5, 5.0, 10\text{cm}$) で配置したもの (図-4(b))。

(3) 縫地ボルト：表面にアルダイトで砂を付着させた直径 $d=2\text{mm}$ 、長さ $L_R=50\text{cm}$ の針金を、図-4(c) に示すように地表部分から角度 δ ($=60, 90^\circ$) の方向に均等の間隔で配置させたもの ($\delta=60^\circ$ の場合は、一列ごとに向きを反対にして千鳥に配置している)。

4. 2 斜めボルトにおける補強効果

斜めボルトに関しては、補強材角度と長さを変えた場合の補強効果について調べた。図-5に長さ $L_R=60\text{cm}$ の補強材を間隔 $\Delta w=1.0\text{cm}$ 、角度 $\theta=30^\circ$ で打設して、トンネルを $L=50.5\text{mm}$ 引き抜いた時に生じる地中変位ベクトルを示してある。この図よりボルトを打設することにより、補強材上部の地山の変位が小さくなってその変形領域が広くなり、また全変形成分のうち水平成分の占める割合が大きくなっていることがわかる。

図-6に補強材の打設角度 θ を変えた場合の地表面沈下と引き抜き量の関係を示す。同図より、 0° (水平) ではほとんど効果がなく、 $15\sim 30^\circ$ の間で最大の効果を発揮していることがわかる。図-7には補強材の長さの影響を調べるため、角度 $\theta=30^\circ$ で長さ $L_R=15, 30, 60\text{cm}$ と変えて補強材を打設した時のトンネル引き抜きに伴う地表面沈下を示してある。この図より補強材の長さが長いほど地表面沈下防止に効果的であるが、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重要な要素であることがわかる。以上の結果と図-3における主ひずみ方向を考えあわせると、地山が伸び変形をする方向 (ε_s 方向) に補強材を打設すると、補強材と地山の間に働く摩擦がもっとも大きく、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。

4. 3 鏡止めボルトにおける補強効果

図-8に鏡部全面に $L_R=30\text{cm}$ の補強材を間隔 $\Delta w=\Delta h=2.5\text{cm}$ 打設して、トンネルを $L=50.4\text{mm}$ 引き抜いた時の地中変位ベクトルを示してある。

この図より鏡部の変形が小さくなり、鏡部の安定に鏡度目ボルトが非常に効果的であることがわかる。ただし、鏡部の変形が小さいのでトンネル

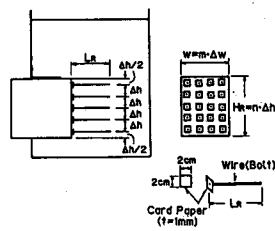


図-4(b)

モデル化した鏡止めボルト工法

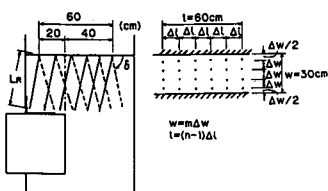


図-4(c)

モデル化した縫地ボルト工法

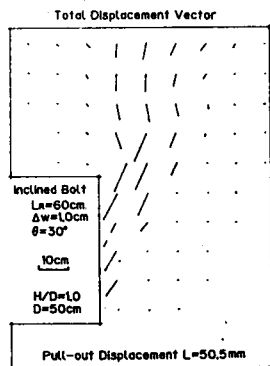


図-5

地中変位ベクトル (斜めボルト)

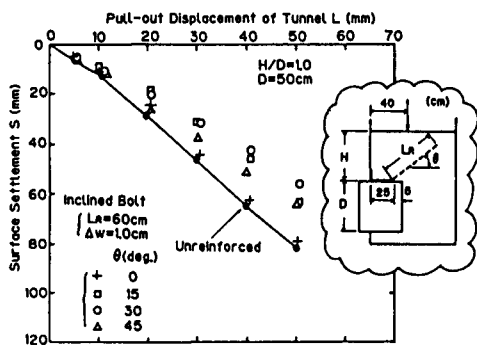


図-6 トンネル引き抜きに伴う地表面沈下

角度の影響

(斜めボルト)

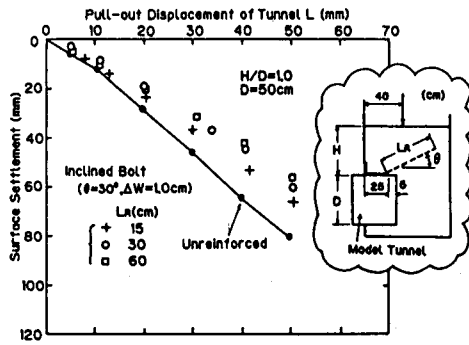


図-7 トンネル引き抜きに伴う地表面沈下

長さの影響

Figure 1 illustrates the experimental setup for the pull-out test. The diagram shows a concrete slab with a grid of reinforcement bars. A 'Face Bolt' is embedded in the slab. The dimensions are specified as $\Delta w = \Delta h = 2.5 \text{ cm}$, $L = 50 \text{ cm}$, $H = 50 \text{ cm}$, and a maximum reinforcement spacing of $\text{max} = 12 \times 20$. A 'Total Displacement Vector' is indicated by an arrow. A 'Pull-out Displacement $L = 50.4 \text{ mm}$ ' is shown at the bottom. A note specifies $H/D = 1.0$ and $D = 50 \text{ cm}$.

Total Displacement Vector

Bolt Reinforcement
 $L=50\text{cm}$
 $\Delta=50^\circ$
 $\Delta w=\Delta=5.0\text{cm}$
 $m \times n=6 \times 13$

10cm

$H/D=1.0$
 $D=50\text{cm}$

Pull-out Displacement Vector
 $L=50, \text{mm}$

Figure 1 is a graph showing the relationship between Surface Settlement S (mm) on the Y-axis and Pull-out Displacement of Tunnel L (mm) on the X-axis. The X-axis ranges from 0 to 70 mm, and the Y-axis ranges from 0 to 120 mm. The graph is divided into two regions: Unreinforced and Reinforced Zone. The Unreinforced region shows a linear relationship with a slope of 1.0 (H/D=1.0). The Reinforced Zone shows a non-linear relationship with a slope of 0.5 (H/D=0.5). A schematic diagram of the tunnel cross-section is also shown, indicating the reinforced zone and the face bolt.

Region	Symbol	Face Bolt L (cm)	$\Delta w = \Delta h$ (cm)	$m \times n$
Unreinforced	+	2.5	12	20
	o	5.0	6	10
	a	10.0	3	5
Reinforced Zone	+	30	12	20
	o	30	6	10

Additional parameters shown in the diagram:

- $H/D = 1.0$ for the Unreinforced region.
- $H/D = 0.5$ for the Reinforced Zone.
- $H = D$ for the Reinforced Zone.
- Reinforced Zone dimensions: 40 (cm), L_n , H_n , D , S , R .
- Face Bolt $L = 30$ cm.
- Reinforced Zone dimensions: $w = \Delta w$, $H = \Delta h$.

Figure 10 is a graph showing Surface Settlement S (mm) versus Pull-out Displacement L (mm). The graph compares unreinforced and bolt-reinforced cases. The bolt reinforcement parameters are $\Delta w = 5.0$ cm, $L = 50$ cm, and $m \times n = 6 \times 13$.

The graph shows that the bolt-reinforced case (marked with circles) exhibits significantly less surface settlement compared to the unreinforced case (marked with plus signs) for the same pull-out displacement.

The diagram on the right illustrates the bolt reinforcement layout, showing a rectangular area of size $H \times D$ with a central bolt reinforcement area of size $L_a \times L_b$. The bolt reinforcement is represented by a grid of circles (25) and squares (6).

こ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がないが、斜めに打設した場合には効果があることがわかる。これは、切羽上部の地山の伸び変形をボルトが地山との摩擦によって拘束するためと考えられる。

トンネルを掘削することは、その地山の応力を開放すること、すなわち地山に除荷の応力変化を与えることに相当する(図-12)。この時地山の伸び変形方向に打設されたボルトの効果をボルトを含む地山要素から考えてみる。図-13に示すように地山要素(abcd)に作用する応力のうち、ボルトも含めたように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っ張力が作用しこの方向の変形を拘束する。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}

v 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でこの方向の応力すなわち最大主応力はボルトにより影響を受けず平均的応力と部分的な応力とはたがいに等しく、

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

である。図-12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、これに釣りあう部分的な応力との水平方向の力のつりあいを考えると

$$\sigma_{3e} \Delta h = \sigma_{3av} \Delta h + T \quad \text{となるから}$$

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

が得られる。

トンネルを掘削することは切羽の平均的な最小主応力 $\sigma_{3av} = \sigma_h \rightarrow 0$ にすることに相当するが、この時の平均てきな応力の変化をMohrの応力円で表わすと図-14の点線の円になる。またボルト周辺の部分的な応力は (2) 式から

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

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。これから平均的な応力では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時の条件(破壊条件)

$R_f = \sigma_1 / \sigma_3 = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$ より求まる $\sigma_3 = \sigma_1 / R_f$ 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

$$\Delta \sigma_3 > \sigma_{3e} \quad (4)$$

であれば破壊状態にいた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ボルトの打設は見掛けの拘束圧を増加させる効果を持っており、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 あとがき

縦断トンネル土槽試験によりボルトを使用した補助工法の補強メカニズムを調べた結果どの補助工法においてもボルトを地山の伸び方向に打設すると効果的であることがわかった。これはボルトが地山との摩擦により地山の伸びを拘束するためと考えられる。

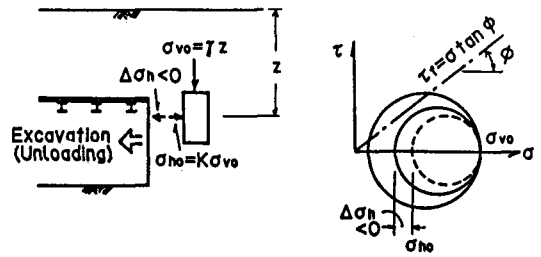


図-12

トンネル掘削による応力変化

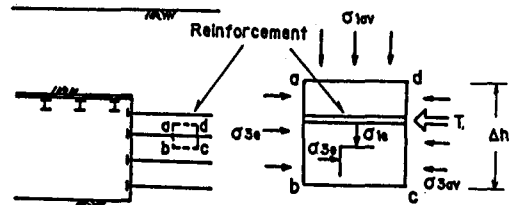


図-13

地山要素の応力状態

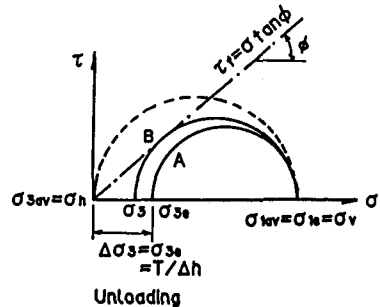


図-14

地山要素のトンネル掘削による応力変化