

模型実験による土砂地山トンネルにおける ロックボルト効果に関する一考察

森本 智^{1*}・真下 英人²・角湯 克典¹・日下 敦¹

¹独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ（トンネル）（〒305-8516茨城県つくば市南原1-6）

²独立行政法人土木研究所 道路技術研究グループ（〒305-8516茨城県つくば市南原1-6）

*E-mail: morimoto@pwri.go.jp

土砂地山に掘削されるトンネルは、標準支保パターンは設定されておらず、合理的な設計を行うためには、支保部材の効果とそのメカニズムについて明らかにする必要がある。本研究では、土砂地山トンネルにおけるロックボルトの作用効果を把握するため、ロックボルトの長さや間隔・配置などを変化させて模型実験を実施した。その結果、トンネル模型に作用する荷重は、掘削を模擬した変位を与えることで減少するが、ロックボルトによる荷重の低減効果を期待するためには、天端部においては共下がり領域外側の自立した領域に達するボルト長さが必要となること、側壁部においては、打設間隔についてある程度密にする必要があることおよび、曲げ剛性を有する材料を用いる必要があることなどがわかった。

Key Words : mountain tunnel in soft ground, rock bolt, through model tests

1. はじめに

土砂地山トンネルの掘削においては、支保パターンDIIIを経験的に採用することが多いが、ロックボルト等の支保工の作用効果は必ずしも明確になっていない。特に、天端部については打設が省略される場合がある。本検討では、土砂地山を想定した模型実験により、ロックボルトの打設範囲、長さ、打設間隔等がトンネルに作用する荷重に与える影響について検討した。

2. 実験の概要

(1) 概要

実験は標準砂および珪砂を使用し、ロックボルトの長さ L 、打設間隔 α 、材料などを変化させ、トンネル模型に作用する荷重に与える影響を把握することを目的に実施した。図-1に実験装置の概要を示す。トンネル模型は外径 $D=200\text{mm}$ で、内寸幅 $1,200\text{mm} \times$ 奥行き 450mm の土槽の底面中央に設置してある。トンネル模型周辺には厚さ 0.2mm のテフロン製シートが25枚重ねられており、このシートを1枚ずつ引き抜くことでトンネル掘削を模擬した。模擬地山は、ロックボルトを固定治具によりあらかじめ所定の位置に設置した状態で、気乾状態の地山材料を土被り高さ $3D$ になるまで自由落下方式により作製

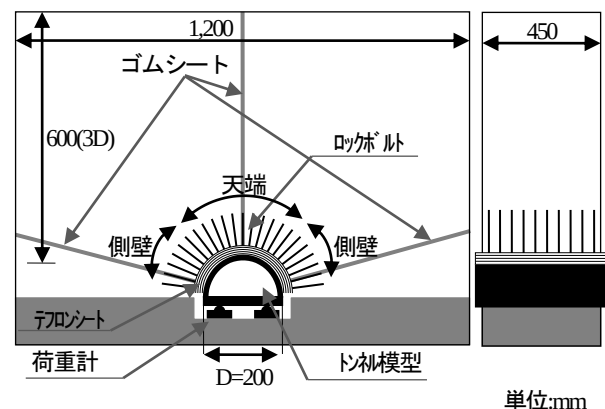


図-1 実験装置の概要

した。なお、固定治具はある程度地山を作成しロックボルトが地山に自立した段階で撤去した。トンネルに作用する荷重は、シートを1枚ずつ引き抜いた各段階においてトンネル模型下部に設置した荷重計により計測を行った。奥行き方向についてはロックボルトを 40mm ピッチで10断面の打設を行った。また、無対策においてはシートの引抜きによる地山の挙動を把握するため、深さ方向

表-1 実験ケース

打設 範囲	地山 材料	ロックボルト材料		
		材料	長さ L(mm)	間隔 α(°)
無対策	標準砂	－		
無対策	珪砂	－		
天端	標準砂	リ青铜	300	7.5
			150	7.5
	珪砂		150	7.5
			80	7.5
側壁	標準砂	リ青铜	300	7.5
			80	7.5
			80	15
		PP材*	80	7.5

*:PP材とはポリプロピレン繊維をいう

に一定間隔で色砂を配置し、地山の変位領域について観察を行った。また、天端部および側壁部に天然ゴムシートを埋め込み、シート表裏に貼付したひずみゲージにより地中ひずみの計測を行った。ゴムシートは厚さ1mm程度、幅50mmの天然ゴム製で、長さは天端部が550mm程度、両側部が300mm程度である。なお、ロックボルト模型、および天然ゴムシートには地盤との付着がとれるよう表面に砂を塗布した。表-1に実験ケースを示す。

3. 実験の結果

(1) 無対策について

図-2に無対策におけるトンネル模型に作用する荷重の初期荷重（シートを引抜く前の作用荷重）に対する割合（以下、「荷重比」という）と、変位量（掘削を模擬するために引抜いたシートの厚さ）の関係について示す。標準砂の場合、荷重比は変位量が0.2mmで0.6程度まで減少し、さらに変位を増すと荷重比は徐々に低下し最終的には0.4程度となった。珪砂の場合、荷重比は変位量が0.2mmで0.4程度まで大きく減少し、さらに変位を増すと1mm程度まで減少するが、その後はほぼ一定の値となり最終的には0.2程度となった。

図-3に無対策における撮影した写真から色砂の移動量を読み取った変位量等高線（1mmピッチ）を示す。最終変位量と同じく5mm変位した領域（以下、「共下がり領域」という）は、標準砂の場合、肩部から天端上方250mm程度の領域に形成される。一方、珪砂の場合、肩部から天端上方50mm程度の領域に形成されることが確認できた。

図-4に天端部における軸ひずみを示す。計測したひずみ値は、軸ひずみ、および曲げひずみに変換し整理した。軸ひずみは表裏ひずみ値の和の半値、曲げひずみは表裏ひずみ値の差分の半値とした。標準砂の場合、変位0.2mmでトンネル模型端部から226mm高さを境にそれより低い領域が圧縮域となり、それより高い領域が引張り

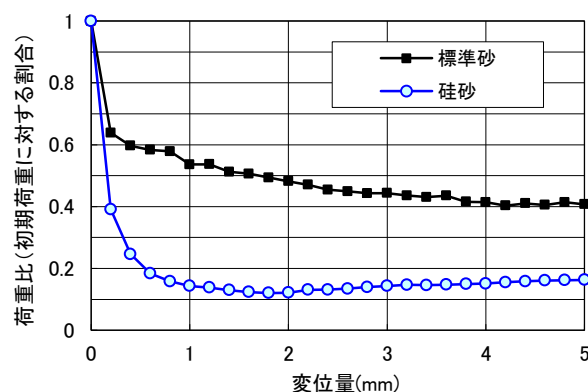


図-2 荷重比と変位量(無対策)

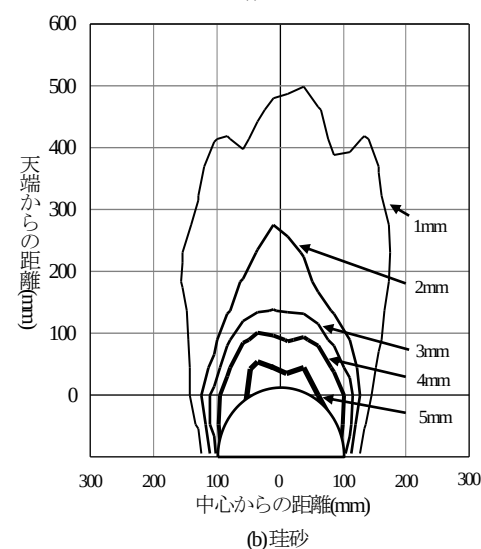
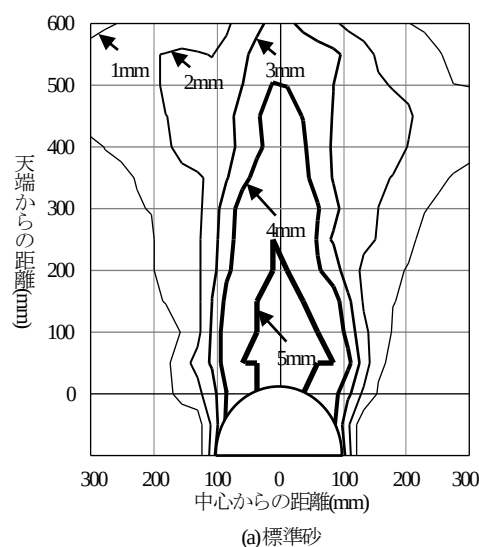


図-3 等変位コンター図(無対策)

域となった。その後、変位を増し最終変位量では106mm高さを境にそれより低い領域が圧縮域となり、それより高い領域が引張り域となった。珪砂の場合、変位0.2mmで66mm高さを境にそれより低い領域が圧縮域となり、それより高い領域が引張り域となった。その後、変位を増し最終変位量では全域において引張り域となった。ゴ

ムシートが周辺地山と一体となって挙動していると仮定すれば、圧縮となる領域は掘削を模擬した変位と同様またはそれ以上に地山が変形していると考えられることから、共下がり領域と考えることができる。また、引張りとなる領域は掘削を模擬した変位により小さく変形していると考えられることから、地山は変形しているものの、地山側に自立しようとする領域と考えることができる。このことから、標準砂、および珪砂の共下がり領域高さは、図-3から把握した値と比較すると多少の違いはあるものの、全体の傾向としては概ね整合している。

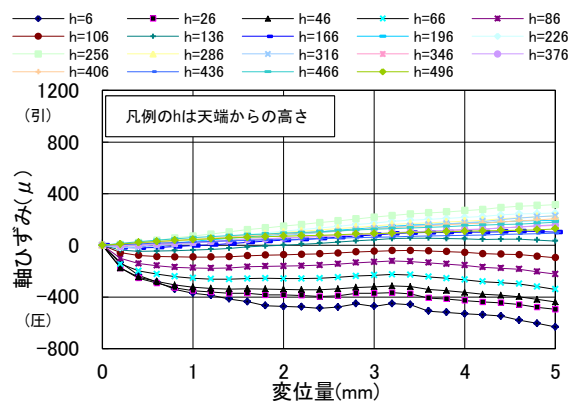
図-5に変位量5mmにおける地山のひずみ分布図を示す。軸ひずみ分布の結果から、天端部においては先ほど示したとおりであり、側部については標準砂、珪砂ともにトンネル壁面から106mm程度まで引張りの軸ひずみが確認でき、地山側に自立しようとする領域が把握できる。曲げひずみ分布の結果からは、標準砂、珪砂ともにトンネル側壁近傍に限り大きな曲げひずみが確認できる。この領域は、掘削により生じた地山のすべりによるものと考えられ、その範囲は、トンネル近傍に限られる。

以上のことから、掘削により発生する共下がり領域は、標準砂の場合トンネル上方まで比較的大きく進展し、珪砂の場合トンネル近傍に形成されることから、トンネルに作用する荷重は、標準砂は大きくなり、珪砂は小さくなると考えられる。

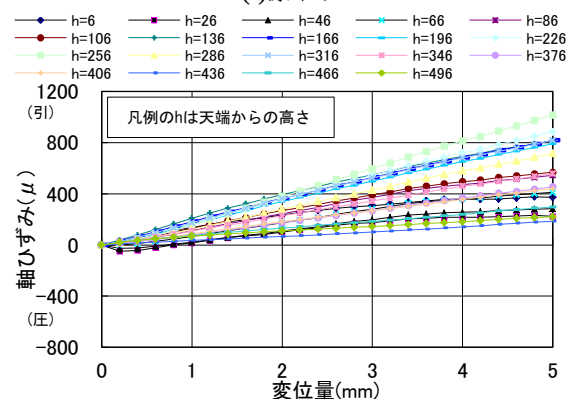
(2) 天端に打設した場合について

(1)で示したとおり掘削により天端部に生じる共下がり領域は、標準砂の場合比較的上方まで進展し、珪砂の場合は天端近傍に形成される。天端部にロックボルトを打設するケースでは、この領域に着目し、ロックボルト長さを変化させた実験を実施した。なお、共下がり領域の高さは、図-3に示した等変位コンター図から求めた値を用いることとし、標準砂は250mm、珪砂は50mmとする。

図-6に天端部に打設した場合の荷重比と変位量の関係を示す。標準砂の場合、共下がり領域は天端から250mm程度まで発達しており、それよりも短いボルト長さL=150mmでは無対策と同程度の荷重比となり荷重低減効果が得られなかった。一方、共下がり領域よりも長いL=300mmでは初期段階では効果が得られないものの、変位量が2mm程度以降においては効果が得られることが確認された。また、珪砂の場合、共下がり領域は天端から50mm程度であり、それと同程度のL=80mmでは初期段階から変位量が3mm程度までは効果が得られるものの、最終段階では無対策と同程度となった。一方、L=150mmでは初期段階から最終状態まで効果が持続することが確認された。

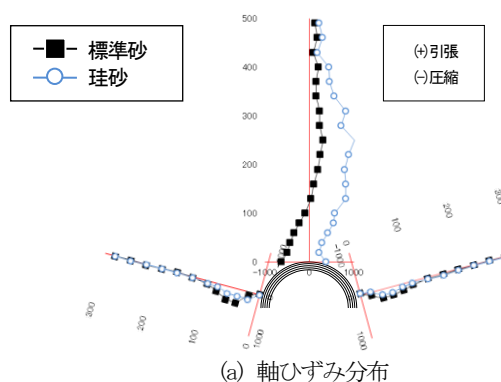


(a) 標準砂

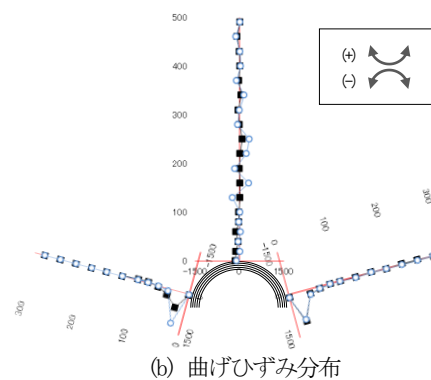


(b) 珪砂

図-4 軸ひずみ (天端部)



(a) 軸ひずみ分布



(b) 曲げひずみ分布

図-5 ひずみ分布図

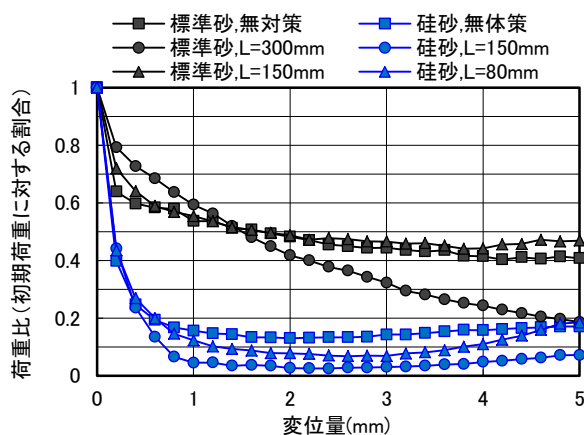


図-6 荷重比と変位置(天端打設)

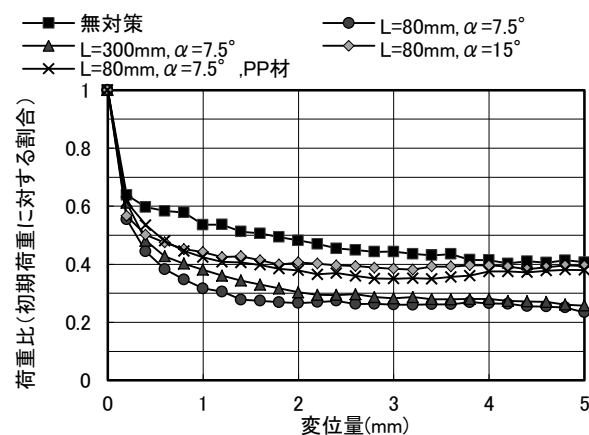


図-7 荷重比と変位置(側壁打設)

(3)側部に打設した場合について

(1)で示したとおり、トンネル側壁部には、標準砂、珪砂ともに掘削により発生した地山のすべりにより、近傍に限り大きな曲げひずみが生じている。側壁部にロックボルトを打設するケースでは、標準砂の地山を用いて、打設ピッチ、およびロックボルト材料を変化させた実験を実施した。

図-7に側壁部に打設した場合の荷重比と変位置の関係を示す。まず、打設間隔が $\alpha=7.5^\circ$ の場合、 $L=80\text{mm}$ でも $L=300\text{mm}$ と同程度以上の十分な効果が得られた。これは、側壁部においては壁面近傍にすべり（変位する領域としない領域の境界）が発生し、このすべりと十分に交差する長さであれば、ロックボルトのせん断抵抗による効果が現れたためと考えられる。一方、ボルト長さ $L=80\text{mm}$ で打設間隔を倍に上げた $\alpha=15^\circ$ の場合、無対策より効果はあるものの、打設間隔が $\alpha=7.5^\circ$ と比較すると効果は小さくなった。また、 $\alpha=7.5^\circ$ で、ボルト材料をリン青銅と比較し曲げ剛性が非常に小さいポリプロピレン樹脂にした場合、無体策より効果はあるものの、リン青銅と比較すると効果は小さくなった。

4. まとめ

本模型実験の結果から、ロックボルトによる荷重低減効果を期待するには、共下がり領域外側の自立した領域に達するボルト長が必要となることがわかった。特に、天端部においては地山材料の違いにより形成される共下がり領域の高さは異なり、その領域の把握が重要となる。一方、側壁部においては、すべりがトンネル壁面近傍に形成されるため、比較的短いロックボルトでも効果が期待できること、また、打設間隔についてはある程度密にする必要があること。また、ロックボルトの曲げ剛性が重要であることがわかった。

参考文献

1)森本智, 真下英人, 日下敦, 角湯克典: 土砂地山トンネルにおけるロックボルト効果に関する実験的研究, 第65回年次学術講演会講演概要集, 2010

EFFECT OF ROCK BOLTS ON MOUNTAIN TUNNEL IN SOFT GROUND THROUGH MODEL TESTS

Satoshi MORIMOTO, Hideto MASHIMO, Katsunori KADOYU, Atsushi KUSAKA

Support structure of mountain tunnel in common ground is designed generally by adopting standard support pattern, which is prepared as to ground class graded with empirical knowledge. Rockbolt was needed to be reached to self-supported ground. It was near excavating surface on sidewall in sandy ground, though it was pretty far on crown.