

トンネルの支保効果に関する研究

足立 紀尚・八嶋 厚・上野 洋

FUNDAMENTAL STUDY ON TUNNEL SUPPORT

By Toshihisa ADACHI, Atsushi YASHIMA and Hiroshi UENO

Synopsis

The mechanical efficiency of rock bolts and the development of loosened zone in the surrounding ground due to tunnel excavation were investigated by model tests. Firstly, model tests were carried out by paying attention to the friction between rock bolts and sand ground as well as the installation pattern of rock bolts. Secondary, a circular tunnel excavation was simulated by shrinking a metal cylinder in a aluminium rod mass and the development of loosened zone in the surrounding ground due to tunnel excavation was discussed.

1. は じ め に

筆者らは、薄肉柔支保構造の効果がどのようなものであるかを、地山材料に乾燥した硅砂を用い、吹付けコンクリート及びロックボルトを紙でモデル化した土槽実験によって定性的説明を試み、前年度までに次のような結論を得た^{1),2)}。

1. 切羽の安定性は土かぶりによらない。
2. 覆工が厚い程地山は安定する。
3. 地山を緩めると地山は不安定になる。
4. ロックボルトは長い程有効である。
5. ロックボルトは1次領域及び2次領域を含めたゆるみ領域外にどれだけ出ているかでその有効性が決まる。
6. トンネルはスプリングライン上方 45° 近辺で破壊が生じる。

またトンネル掘削に伴うゆるみ領域の発達過程を見るために、アルミ棒積層体を用いて半円形の降下床実験を行った。その結果、トンネル掘削に伴うゆるみ領域はスプリングライン上方 40° 近辺から上方の部分に限られていることがわかった。

しかし、土槽実験においては、ロックボルトの支保効果を単にその長さだけに注目して論じている。そこで、本研究ではロックボルトが地山に付着している事実に着目し、紙でモデル化したロックボルトにのりで付着力を付加し、付着力の有無による挙動の差異及びロックボルトの打設位置の違いによる支保効果の差異の2点に着目して、昨年に引き続き同様の土槽実験を行った。一方、降下床実験ではトンネル下部半断面のトンネル掘削による周辺地山への影響を説明できないことと、トンネル壁面のスプリングラインとの交点が変位の特異点になるなどの欠点を持つため、本研究ではアルミ棒積層体中に直径可変な金属円筒を挿入し、金属円筒の直径の収縮によりトンネル掘削をシミュレートした。

2. 実験装置及び実験方法

薄肉柔支保構造の効果を、まず地山材料に乾燥砂を用い、吹付けコンクリートとロックボルトを紙でモデル化した実験によって定性的な説明を試みた。次いで、アルミ棒積層体中のトンネル掘削シミュレーション

実験によってトンネル周辺地山内にゆるみ領域がどのように発達するかを調べた。

2.1 土槽実験

実験には高さ 80 cm, 幅 90 cm, 奥行き 30 cm の土槽と直径 8 cm の金属円筒を準備し, 地山材料として標準フルイ 420 μ 未通過分の珪砂を用いた。またロックボルトのモデル化には厚さ 0.18 mm ケント紙を, 吹付けコンクリートのモデル化には厚さ 0.045 mm のトレーシングペーパーをそれぞれ用いた。

まず土槽実験を行う前に, ロックボルトとして用いたケント紙と地山材料珪砂との間の摩擦係数を, 幅 1 cm, 長さ 8 cm に切ったケント紙の両面にのりを付着した場合とさせない場合の各々について, Fig-1 のような装置を作り, 荷重を 400 g, 800 g, 1200 g, 1600 g と変え, ばねばかりで引っ張り, 引き抜ける時の張力を読み取ることによって調べた。

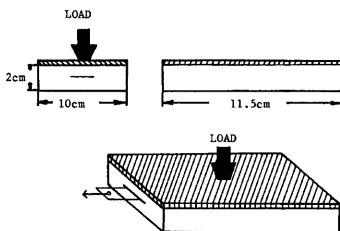


Fig. 1 Apparatus for measuring friction between paper for rock bolts and sand.

Table 1 Configuration of rock bolts.

Basic Type	Type 1	Type 2	Type 3

行った土槽実験の種類は, 実験 A と実験 B である。すなわち, 実験 A はロックボルトの長さや付着力の違いによる地山の安定性の相違を調べるためのもので, ロックボルトの長さを 2 cm, 3 cm, 4 cm, 5 cm の 4 段階に変化させ, また各々の長さのロックボルトについてのりを付着した場合と付着させない場合について実験し付着力による支保効果を検討した。実験 B はロックボルトの打設位置の違いによる地山の安定性の相違を調べるためのもので, 実験 A が Table-1 に示される「基本型」の打設であったのに対して, 新たに 3 つのタイプの打設位置について実験を行った。なおロックボルトの長さはそれぞれのタイプとも 8 cm と固定した。実験手順については文献 1) に詳しく述べているが, 本研究では文献 1) の実験とは異なり地山の締固めを行わずゆるんだ状態で実験を行った。これはロックボルトが地山内に存在する場合その近傍の締固めが不十分となり地山が不均一となってしまうことを防ぐためである³⁾。

2.2 アルミ棒積層体実験

村山ら⁴⁾は, 地山材料にアルミ棒を用いて降下床模型実験を行った。その結果 Fig-2 に示すように降下床と同一の移動をする 1 次領域とこの 1 次領域に追従してゆっくり移動する 2 次領域および 2 次領域の外側にあって, 降下床を降下させても土粒子が移動しない静止領域に分かれることを明らかにした。筆者らは, 1 次領域及び 2 次領域を含んだゆるみ領域が降下床が半円形 (トンネルの上部半断面) の場合どのように広がるかを調べるためにアルミ棒積層体を用いて降下床実験を行った。しかし, 降下床実験ではトンネルの下部半断面の掘削による周辺地山への影響を解明できないことと, トンネル壁面のスプリングラインとの交点の変位の特異点になるなどの欠点を持つため, 今回はアルミ棒積層体中に直径可変な金属円筒を挿入し, 金属円筒の直径を徐々に収縮させることによってトンネル掘削をシミュレートする。

長さ 50 mm のアルミ棒を水平に積み上げた積層体として地山を形成するが, 積層体は直径 1.6 及び 3 mm のアルミ棒を重量比 3 : 2 で混合して準備した。これは標準砂の粒径相積曲線にほぼ平行になる割合である。Photo-1 はアルミ棒積層体を用いた実験装置を示している。所定の混合比に混合されたアルミ棒を左右の仕切り壁面に積み上げた後, 積層体前面にサインペンで標線を描いた。トンネル掘削は直径可変の金属円筒を

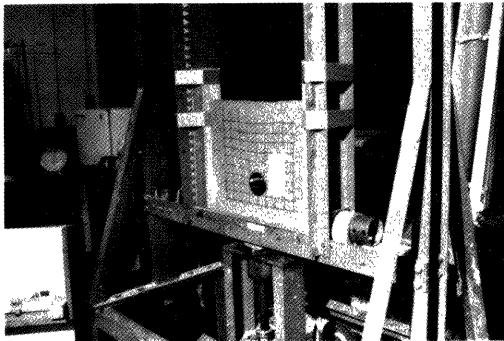


Photo. 1 Apparatus used in model test of tunnel excavation.

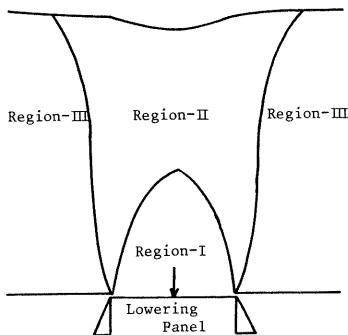


Fig. 2 Various regions developed in sandy ground.

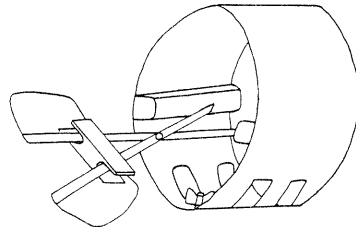


Fig. 3 Device for shrinking the metal cylinder.

収縮させることでシミュレートする。金属円筒の収縮は Fig.-3 に示すように金属円筒内壁に添え木を配し、積層体背面からそれをヒンジで支持した装置により行った。金属円筒の収縮に伴う地山の動きは、地上に固定したカメラを用いて金属円筒が直径約 5 mm 収縮する間の変化を同一のフィルムに重ね撮りすることで記録した。これによると金属円筒の収縮による地山のゆるみ領域は、不鮮明な画像として写り地山の移動部分を調べることができる。

3. 実験結果と考察

3.1 土槽実験

Fig.-4 にケント紙の引き抜き抵抗から求めた $\tau \sim \sigma_n$ 関係を示す。図中「|—|」は τ 値のパラツキの幅を示し、●、○印はその平均値を示す。これよりケント紙にのりを塗布することにより地山との間の摩擦係数はかなり増大し、約 2 倍となることがわかる。

Fig.-5 に実験 A の結果を示す。これより以下の知見が得られる。

- (1) のりを付着していないものは、 $L=2\text{ cm}, 3\text{ cm}, 4\text{ cm}, 5\text{ cm}$ のいずれの場合においても、土かぶり小さい場合を除いて支保効果の増大はほとんど見られない。
- (2) のりを付着したものは、 $L=2\text{ cm}, 3\text{ cm}$ とロックボルトの長さがかなり短い場合には、のりを付着し

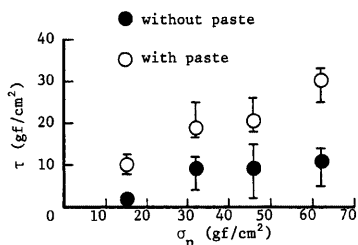


Fig. 4 Friction between paper for rock bolts and sand.

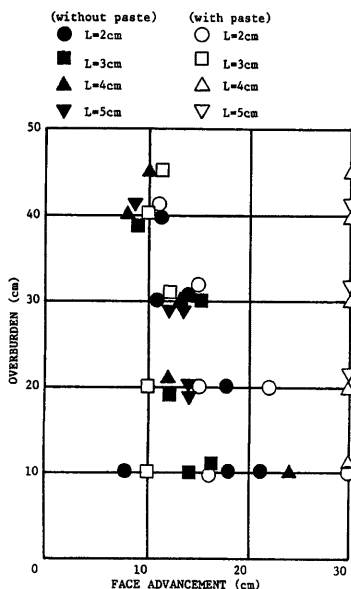


Fig. 5 Relation of tunnel advancement at tunnel collapse vs overburden, for test A.

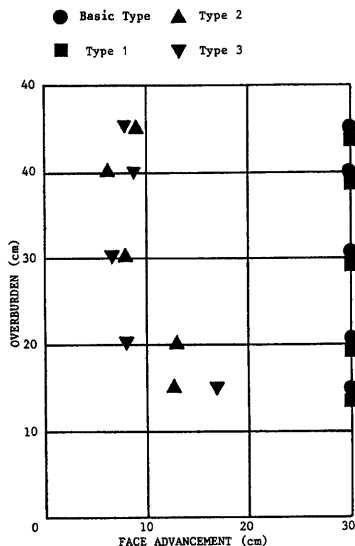


Fig. 6 Relation of tunnel advancement at tunnel collapse vs overburden, for test B.

ていない場合と同様の挙動を示し、地山と一体となって変形し破壊に至る。しかし、 $L=4\text{ cm}$, 5 cm の場合には金属円筒を引き抜いていくにしたがって覆工が局所的に大変形するものの、 30 cm まで金属円筒を引き抜いてもトンネルは保持される。

この結果より、ロックボルトと地山の付着力は覆工の破壊を防ぐ一助となることが理解できる。

Fig.-6 に実験 B の結果を示す。これより以下の知見が得られる。

- (1) ロックボルトの打設がもたらす支保効果は、スプリングライン上方 45° の位置のものが有効であり、天端方向とスプリングライン上に打設したロックボルトについてはその有効性を見い出せなかった。
- (2) 天端方向の打設に効果が現われなかったのは、トンネル天端付近より急速に成長するゆるみ領域内にロックボルトが含まれてしまっているためであり、スプリングライン上方 45° の位置の打設に効果が現

われたのは、ゆるみ領域外にロックボルトが出ていたためと考えられる。

3.2 アルミ棒積層体実験

Fig.-7, 8 は、重ね撮り写真をもとに金属円筒の収縮につれてゆるみ領域がどのように拡大するかを図示したものである。Fig.-7 は土かぶり 30 cm, Fig.-8 は土かぶり 15 cm の場合をそれぞれ表わしており、図中破線は金属円筒の収縮の様子を表わしている。これより次のことがわかる。

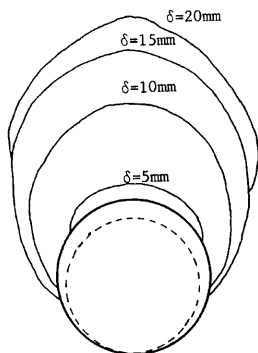


Fig. 7 Development of loosened zone by model test of tunnel excavation, for high overburden.

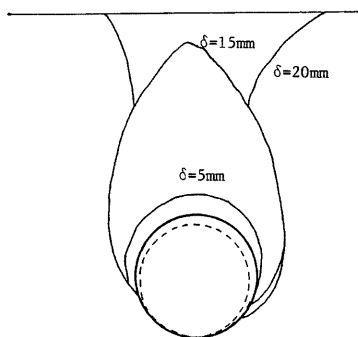


Fig. 8 Development of loosened zone by model test of tunnel excavation, for low overburden.

- (1) トンネル周辺のゆるみ領域の発達過程を見ると、まずやや平坦なゆるみ領域が天端よりトンネル壁面をおおうように生じ、次いで天端より上方に急速に広がりその領域はスプリングラインの下方にまで及ぶことがわかる。筆者らは先に半円形の降下床を用いた同様の実験を行っているが、それではゆるみ領域の広がりはスプリングライン上方 40° 付近から上方の部分に限られており、適切なゆるみ領域を表現していなかったことがわかる。
- (2) Fig.-8 からでもわかるように、土かぶりが小さい場合にはゆるみ領域は天端上方で地表面に達した後さらに横方向へ広がる。

4. む す び

本研究では、地山材料に乾燥した珪砂を用い、吹付コンクリート及びロックボルトを紙でモデル化した実験を行うことにより、ロックボルトの支保効果の定性的な解明を試みた。この実験を通じて以下のような結論が得られた。

1. ロックボルトは長い程有効である。
2. ロックボルトと地山の間の付着力はトンネルの安定に有効である。
3. ロックボルトの打設による支保効果は、ロックボルトがゆるみ領域外に出ている場合非常に有効であり、ゆるみ領域内にむやみに数多くのロックボルトを打設しても無意味である。
4. 3 との関連において、ロックボルトはななめ上方に打設するのが効果大きい。

さらに、トンネル掘削に伴うゆるみ領域の発達過程を把握するために、アルミ棒積層体を用いてトンネル掘削シミュレーション実験を行った。その結果以下の点が明らかとなった。

1. ゆるみ領域は天端上方に急速に広がり、ついにはスプリングラインの下方にまで及ぶ。

2. 土かぶりの小さい場合には、ゆるみ領域は天端上方で地表面に達した後さらに横方向へ広がる。

今回行った実験では、定性的な地山の変形のみを考慮しており地山内の変位、応力については何ら言及していない。したがって、吹付コンクリートやロックボルトの設計指針を確立するためには、地山内の変位、応力を測定することによって各支保構造における効果の差異を定量的に把握する必要がある。

参 考 文 献

- 1) 足立紀尚・田村 武・八嶋 厚・木村 亮：トンネルの支保効果に関する基礎研究，京都大学 防災 研究所年報，第25号，昭57. 4，pp. 85-99.
- 2) 木村 亮：トンネルの支保効果及び土圧に関する実験的研究，京都大学工学部卒業論文，昭57.
- 3) 上野 洋：トンネルの支保効果に関する基礎的研究，京都大学工学部卒業論文，昭58.
- 4) 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，昭46，pp. 95-108.