

土砂地山におけるロックボルトの効果に関する遠心力模型実験

Centrifugal model test on the effect of rockbolt in sandy ground

鈴木正彦¹⁾, 真下英人²⁾, 高根 努³⁾, 藤井邦男¹⁾

Masahiko SUZUKI, Hideto MASHIMO, Tsutomu TAKANE, and Kunio FUJII

The effect of rockbolt on the ground stability around a tunnel in sandy and shallow overburden ground was not clarified, and the appropriate length and arrangement of them should be established.

Centrifugal model test using rockbolt was carried out, and the results on the effect of the rockbolt were acquired as follows :

- (1) Placing in the part near crown was most effective, and in the part of wall was no effect.
- (2) In placing many rockbolt, the length could be shortened to keep crown stable.
- (3) In placing long rockbolt, the density of them could be sparse.

Keyword : shallow tunnel, sandy ground, rockbolt, centrifugal model test

1. はじめに

山岳トンネル工法は、吹付けコンクリート、支保工、ロックボルトを主たる支保部材として、地山が本来保有する強度を保持しながら掘削を進めるいわゆる NATM 工法が主流となっている。

しかしながら、トンネルを効果的に支持する支保部材の一つである、ロックボルトの効果は、①縫い付け効果(吊下げ効果)、②はり形成効果、③内圧効果、④アーチ形成効果、⑤地山改良効果など概念的に示されているものの、土被りが薄く、十分な地山強度が得られない土砂地山におけるロックボルトの作用効果は未だ不明な点が多く、適切な長さ、配置等は明らかにはなっていない。

本研究では、土被りが薄く未固結な土砂地山におけるロックボルトの作用効果を確認するため、ロックボルトの径、打設間隔、打設長および打設範囲を変化させ、適切な長さ、配置等を確認するために遠心力载荷模型実験を実施した。

2. 実験方法

実験には、図-1に示す、内寸が140×500×400(mm)で前面が透明なアクリル板からなる模型容器(以下、砂箱という)を使用した。砂箱にはアクリル製の半円筒の支保模型とトンネルの掘削を模擬するトンネル掘削模擬装置からなるアクリル製の半円

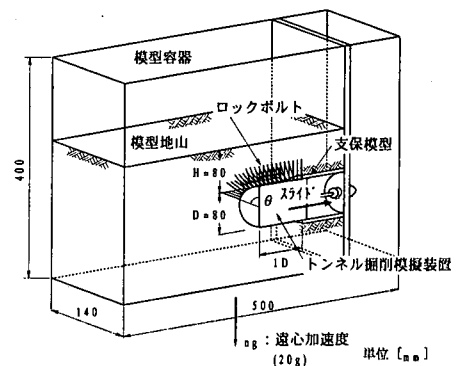


図-1 実験装置概要図

- | | |
|-----------|--------------------------------------|
| 1) 正会員 | 建設省土木研究所 道路部トンネル研究室 |
| 2) 正会員 工博 | 建設省土木研究所 道路部トンネル研究室 |
| 3) 正会員 | (株)オリエンタルコンサルタンツ 関西支社 (元土木研究所 交流研究員) |

柱の直径 $D=80\text{mm}$ のトンネル模型が設置してある。実験は、模型地盤内にロックボルトとトンネル模型を設置した砂箱を遠心載荷し、所定の遠心加速度($20g$)に達した段階でトンネル掘削模擬装置を引き抜いて1Dの素掘区間を設け、地山の安定状態を確認した。模型地山には、不飽和状態にある豊浦標準砂を使用し、水のサクシオン効果によりわずかな粘着力を持たせてある。地山の作成方法は、表-1の物性値となるように、2cm毎に締め固めを行い、土被り比 H/D (H :トンネル土被り、 D :トンネル径)は1とした。

ロックボルトの設置は、地

山作成後に前面の亚克力板を一旦取り外し、トンネル掘削模擬装置を引き地山を素掘状態にしてから所定の位置に挿入した後、トンネル掘削模擬装置を当初の位置に戻し実験を行った。ロックボルトにはリン青銅丸棒を使用し、ボルトの表面にはボルトの定着力を確保するためにエポキシ系樹脂により標準砂を付着させてある。実験のパラメータは、表-2に示すように、ボルト径 ϕ 、長さ L 、打設間隔 α および打設範囲 θ を変化させた。なお、縦断方向の打設列数は11列(0.1D間隔)とした(図-2参照)。

3. 実験結果

3. 1 無対策時の崩落形状

無対策時には、1D($=80\text{mm}$)の素掘区間を設けると、写真-1および図-3に示すように素掘区間全長に渡って天端を底辺とした三角錐状の崩落が発生し、崩落は地表面に及んでいる。なお、トンネル掘削模擬装置の引抜きに伴う崩落領域の発生状況は、引抜き開始から約30mmの素掘区間を設けた段階で初期崩落が発生しており、その後、トンネル掘削模擬装置を引き抜くにつれ徐々に崩落範囲は大きく広がる傾向を示した。

表-1 地山物性値

実験材料の物性値		
地山材料 (標準砂)	単位体積重量 γ (kN/m^3)	15.1
	含水比 w (%)	6.5
	粘着力 c (kPa)	4.6
	内部摩擦角 ϕ (deg)	34.5
ロックボルト (リン青銅丸棒)	弾性係数 E (kN/mm^2)	117.6
	断面積 A (mm^2)	2.0 / 0.79

c, ϕ は一面せん断試験(垂直応力 $2.9 \sim 14.7 \text{kN/m}^2$)より求めた。

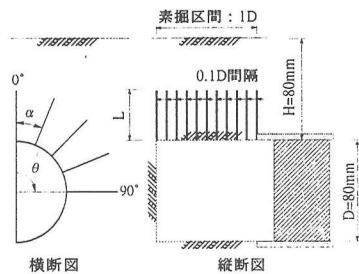


図-2 ロックボルト配置図

表-2 実験ケース一覧表

打設間隔 α	11.25°				22.5°								45°
打設範囲 θ	0° ~90°	0° ~45°	22.5° ~67.5°	45° ~90°	0° ~90°	0° ~45°	0° ~22.5°	22.5° ~67.5°	45° ~90°	22.5° ~45°	45° ~67.5°	0° ~45°	
打設本数 n	9	5	5	5	5	3	2	3	3	2	2	2	
ボルト径 $\phi=1.6\text{mm}$	ボルト長 $L=20\text{mm}$	○	○	○		○							
	ボルト長 $L=40\text{mm}$				○	○	○	○	○				
	ボルト長 $L=80\text{mm}$			○			○			○	○	○	
ボルト径 $\phi=1.0\text{mm}$	ボルト長 $L=20\text{mm}$		○										
	ボルト長 $L=40\text{mm}$	○			○								

○: 実施したケース

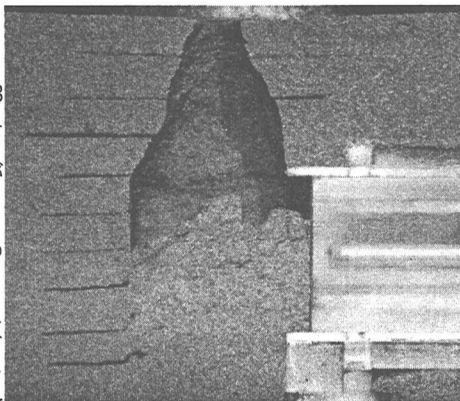


写真-1 無対策時の地山の崩壊形状

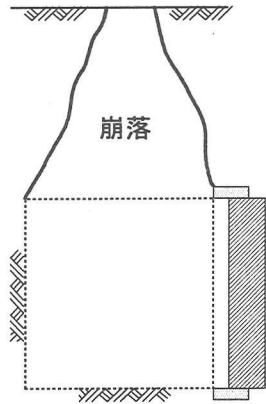


図-3 無対策時の地山崩壊図

3. 2 ロックボルトの打設範囲の影響

図-4は、 $\phi=1.6\text{mm}$ 、 $L=20\text{mm}$ のボルトを $\alpha=11.25^\circ$ のピッチで打設した場合の打設範囲が地山の安定効果に及ぼす影響を示したものである。天端から 90° の範囲に打設したケース(a)および天端から 45° の範囲に打設したケース(b)はともにロックボルトの安定効果が現れており、地山の崩落はほとんど発生しない結果が得られた。これらに対して、 45° を中心に5本打設したケース(c)および 45° から 90° の範囲に打設したケース(d)では安定効果は認められず、素掘の場合とほぼ同様の崩落が発生している。したがって、天端から 45° の範囲にかけて、特に天端付近に打設されたロックボルトが地山の安定効果に大きく寄与しているものと考えられる。

図-5は、 $\phi=1.6\text{mm}$ 、 $L=40\text{mm}$ のボルトを $\alpha=22.5^\circ$ のピッチで打設した場合の打設範囲が地山の安定効果に及ぼす影響を示したものである。天端から 90° の範囲に打設したケース(a)と天端から 45° の範囲に打設したケース(b)では、ロックボルトの安定効果が現れており、地山の崩落はほとんど発生しない結果となっている。これらに対して、 45° を中心に3本打設したケース(c)および 45° から 90° の範囲に打設したケース(d)のように天端にボルトを打設していない場合は地表面までは及ばない

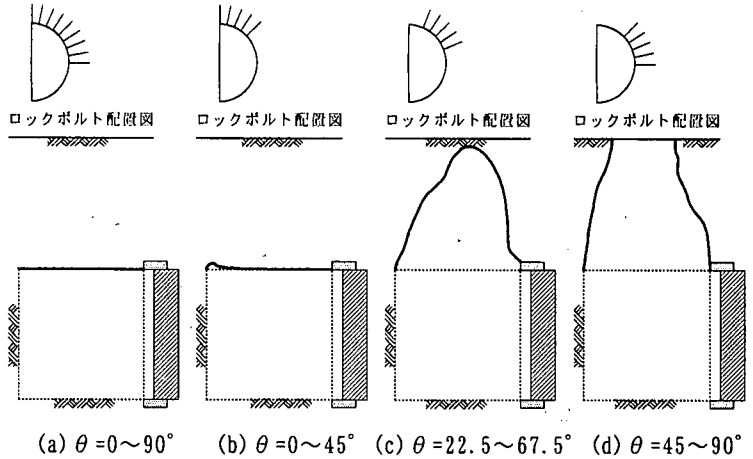


図-4 ロックボルトの打設範囲の影響 ($\phi=1.6\text{mm}$ 、 $L=20\text{mm}$)

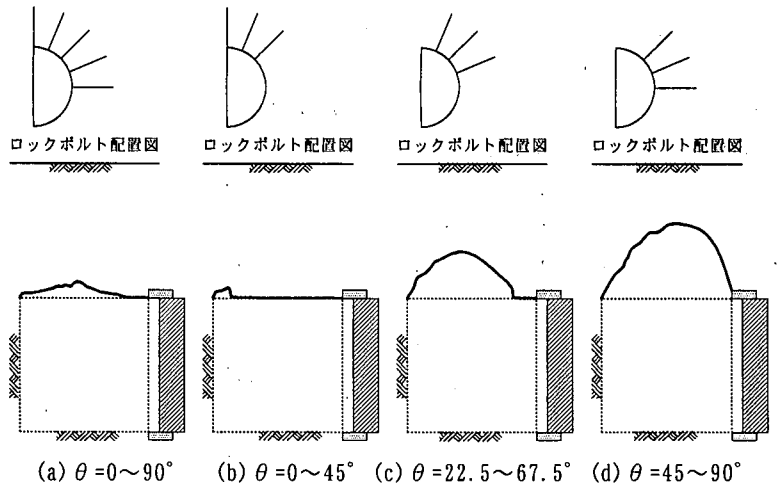


図-5 ロックボルトの打設範囲の影響 ($\phi=1.6\text{mm}$ 、 $L=40\text{mm}$)

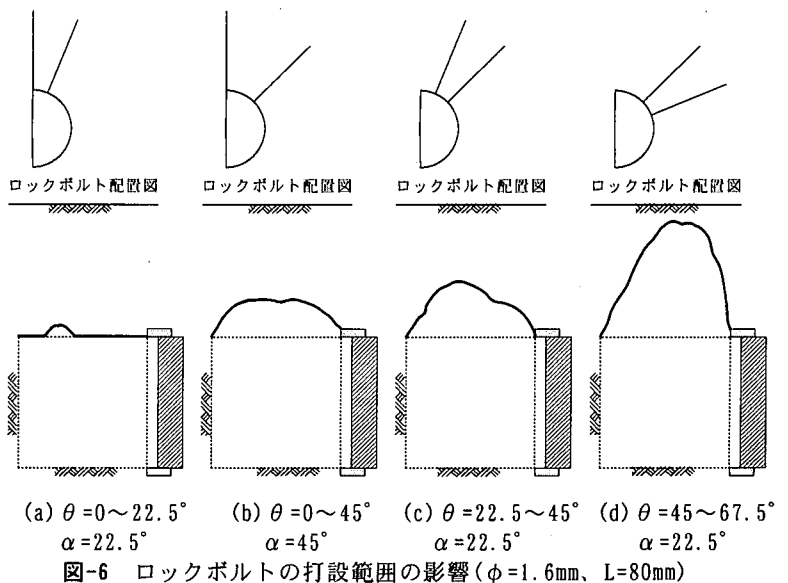


図-6 ロックボルトの打設範囲の影響 ($\phi=1.6\text{mm}$ 、 $L=80\text{mm}$)

ものの天端に崩落が発生する結果となった。

図-6は、 $\phi=1.6\text{mm}$ 、 $L=80\text{mm}$ のボルトを打設した場合の地山の安定効果に及ぼす影響を示したものである。天端から 22.5° の範囲に2本打設したケース(a)では、崩落はほとんど発生しておらず地山の安定効果が認められた。一方、 45° から 67.5° の範囲に $\alpha=22.5^\circ$ のピッチで2本打設したケース(d)では地表面付近まで及ぶ比較的規模の大きい崩落が認められた。また、天端から 45° の範囲に $\alpha=45^\circ$ のピッチで2本打設したケース(b)および 22.5° から 45° の範囲に $\alpha=22.5^\circ$ のピッチで打設したケース(c)では崩落が認められるもののその規模は(d)よりも小さくなっている。したがって、 $L=80\text{mm}$ の場合も天端付近に打設されたボルトが地山の安定効果に最も寄与していると言える。

以上のことを総合すると、土砂地山の場合においても地山条件によっては天端に打設されたロックボルトが地山の安定、特に天端の安定を図る上で重要となる場合があるものと考えられる。

3. 3 ボルト長の影響

図-7は、 $\phi=1.6\text{mm}$ のボルトを打設した場合のボルトの長さが地山の安定効果に及ぼす影響について示したものである。 $\alpha=22.5^\circ$ のピッチで天端から 45° の範囲に打設した場合は、ボルト長が 40mm の場合は地山の安定効果が認められたが、ボルト長が 20mm となった場合は地表面にまで及ぶ大規模な崩落が発生した。また、 $\alpha=22.5^\circ$ のピッチで天端から 22.5° の範囲に打設した場合は、長さ 80mm の場合には地山の安定効果が現れたが、長さ 40mm の場合もほぼ同様の安定効果が現れており、ボルト長の違いによる安定効果の差はそれほど明確には認められない。一方、 45° から 90° の範囲に $\alpha=11.25^\circ$ のピッチで打設した場合は、ボルト長を 20mm から 80mm に変えても若干の効果の向上は認められたものの、大規模な崩落を防止するには至っていない。

したがって、ロックボルトがその効果を発揮するためには、ある一定以上の長さが必要となるが、必要以上に長くすることは得策でなく、また、効果が発揮できない場所に打設した場合は、ロックボルトをいくら長くしても効果の改善はほとんど期待できないと言える。

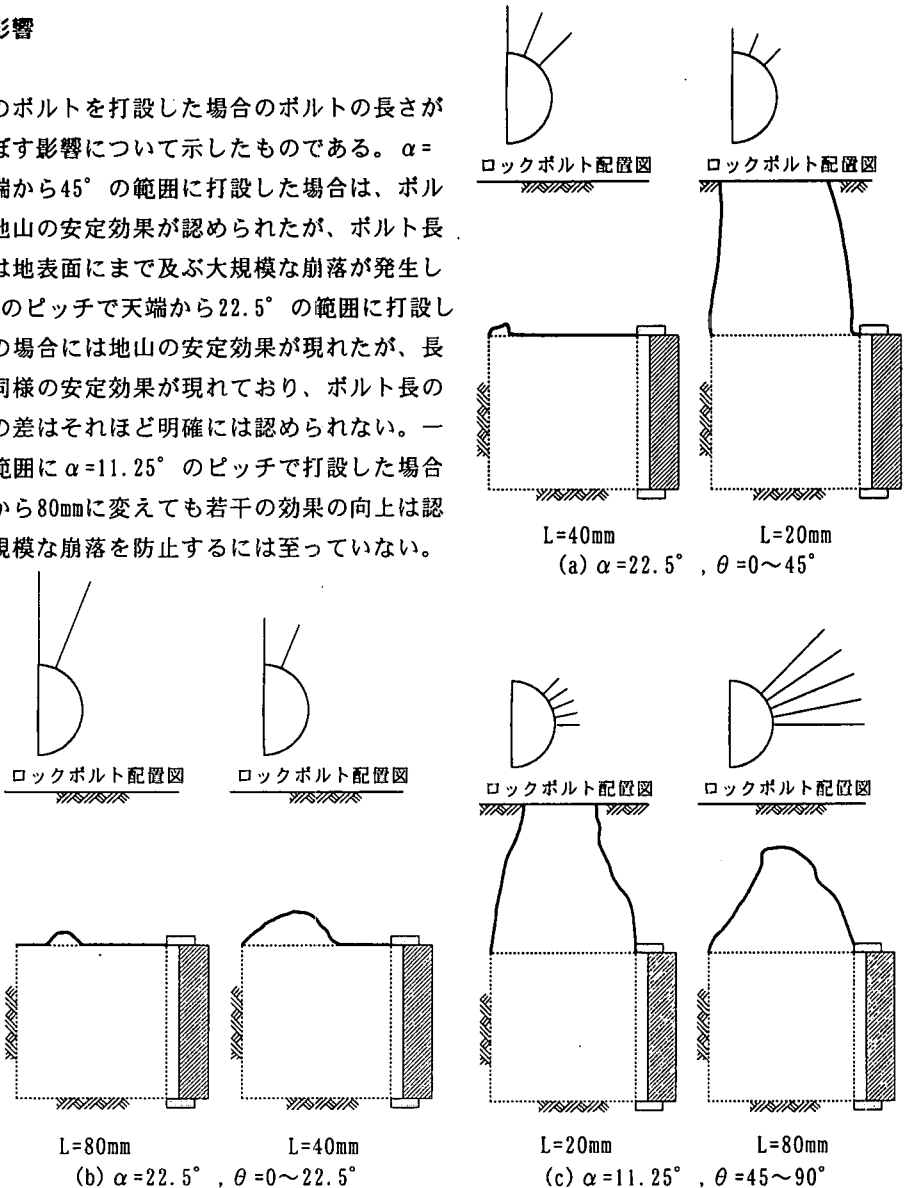


図-7 ロックボルトの打設長の影響

3. 4 打設間隔の影響

図-8は、 $L=20\text{mm}$ のボルトを天端から 45° の範囲に打設した場合の打設間隔が地山の安定効果に及ぼす影響を示したものである。打設ピッチが 22.5° のケースでは地表面にまで及ぶ崩落が発生しているが、 11.25° の場合は、崩落は発生せず地山が安定する結果となっている。

前述したように、ロックボルトが効果を発揮するためには、ある一定以上の長さが必要となるが、今回の結果は施工条件などにより長いボルトが打設できない場合には打設間隔を密にすることにより長いボルトと同等の効果が期待できる場合があることを示唆している。

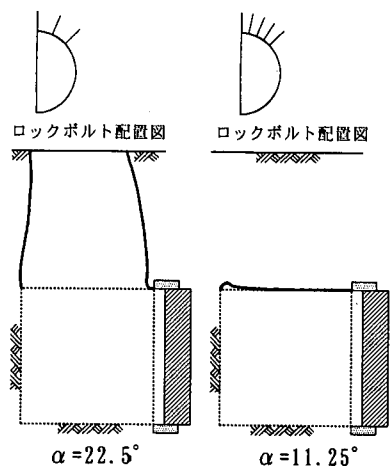


図-8 ロックボルトの打設間隔の影響

3. 5 ボルト径の影響

図-9は、ボルト径が地山の安定効果に及ぼす影響を調べるため、 $\phi=1.6\text{mm}$ のボルトを使用した場合に安定効果が得られた $L=20\text{mm}$ 、 $\alpha=11.25^\circ$ 、 $\theta=0\sim 45^\circ$ と $L=40\text{mm}$ 、 $\alpha=22.5^\circ$ 、 $\theta=0\sim 90^\circ$ の2ケースについて、 $\phi=1.0\text{mm}$ とした場合の地山の崩落状況について示したものである。両ケースとも、ボルト径が細くなった場合には地表面にまで及ぶ崩落が発生しており、ロックボルトが地山の安定効果を発揮するためには一定の太さが必要であることがわかる。

なお、図-10はボルト径が $\phi=1.0\text{mm}$ で長さ $L=40\text{mm}$ のものを打設ピッチ $\alpha=11.25^\circ$ と密にして、 $\theta=0\sim 90^\circ$ の範囲に打設した場合の結果である。ボルト径が細くなくても打設間隔を密にすることにより、ボルト径が太い場合(図-9(b)の $\phi=1.6\text{mm}$ のケース)とほぼ同様の効果が現れており、ボルトの太さの影響は打設間隔と密接に関連しているものと考えられる。

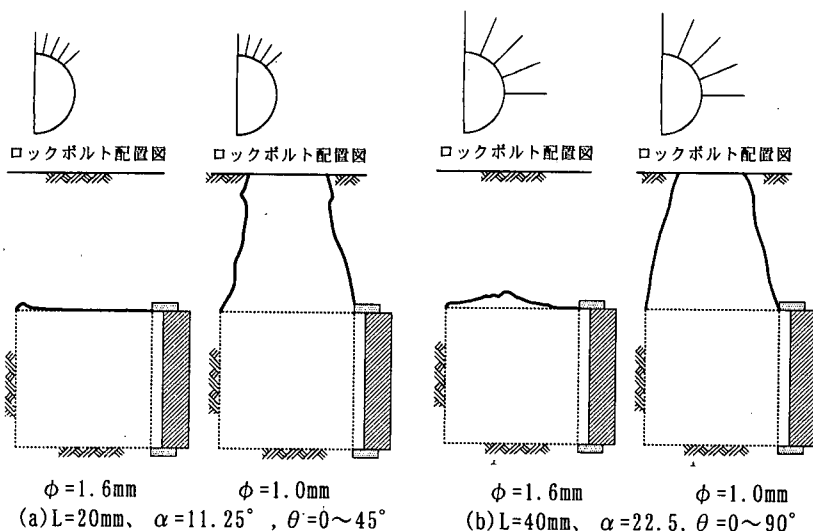


図-9 ロックボルトの径の影響

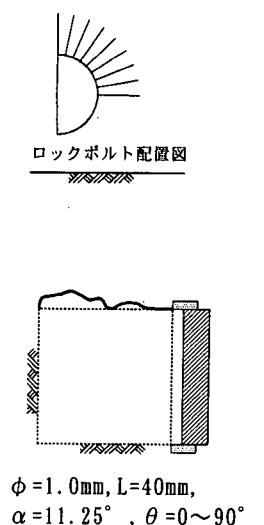


図-10 ロックボルトの径と打設間隔の影響

4. 結論

本研究では、NATM工法の主たる支保部材の一つであるロックボルトの土被りの薄い土砂地山への適用性を検討するための基礎的な研究として遠心力載荷模型実験を実施した。本研究で得られた主な成果をまとめると、以下のようになる。

- 1) ロックボルトの打設範囲については、天端付近に打設されたボルトが地山の安定効果に大きく寄与し、肩部から側壁部に打設されたボルトは地山の安定にあまり寄与しない場合がある。
- 2) ロックボルトが効果を発揮するには、一定の打設間隔とボルト長が必要であるが、ボルト長が短くても、打設間隔を密にすることで長い場合と同等の効果が発揮できる場合がある。
- 3) ロックボルトが効果を発揮するには一定の太さが必要であるが、ボルトの太さの影響は打設間隔と密接に関係する。

5. おわりに

今回得られた結果はある限られた地山条件（地山材料、土被り、側圧等）のもとでのものであり、今後、他の地山条件における検討および数値解析等により現象を明らかにしていきたい。