

◆ 報 文 ◆

土砂地山におけるロックボルトの効果に関する基礎的研究

蒲田浩久* 真下英人**

1. はじめに

山岳トンネルの建設では、吹付コンクリート、鋼製支保工、ロックボルトを主要支保部材として、地山が本来保有している強度を保持しながら掘削を進める NATM 工法が主流である。

その重要な支保部材の一つであるロックボルト工の支保効果に関しては、これまで、岩盤を対象としては多く実施され、縫い付け効果・内圧効果・アーチ効果・地山改良効果などいくつかの概念は整理¹⁾されている。しかしながら、土被りが薄く十分な地山強度が得られない未固結(土砂)地山や土被りが大きくても破砕帯などの軟弱層での効果については不明な点が多く、ロックボルトの適切な配置・必要長さなど明確にされていない。さらに、これまでの実績では、低土被り地山や土砂地山においては、天端部のボルトに圧縮力が作用する計測結果などから、経験的に天端部のボルトを省略する場合が多かった。

本報文では、遠心力载荷模型実験を用い、土砂地山のロックボルトの支保効果を確認し、さらに、その打設範囲、打設間隔および打設長を変化させ実験を行い、適切な配置、必要長さなどを調べた。また、実験結果の妥当性を検証するため、数値解析(3次元弾塑性有限差分法)を行った。

2. 実験方法

実験装置(図-1)は、内寸140×500×400の模型容器に、アクリル製の半円筒の支保模型とトンネル掘削を模擬するアクリル製の半円柱(D=80mm)のトンネル掘削模擬装置を設置したものを使用した。実験手順は、①トンネル模型をあらかじめ設置した容器に、不飽和状態にして少量の粘着力を確保した豊浦標準砂を2cm毎に締め固めて模型地山を作成する(表-1)。②ロックボルトのあるケースは、トンネル掘削模擬装置を引き抜き、地山を素掘状態にして、前面のアクリル板を一旦

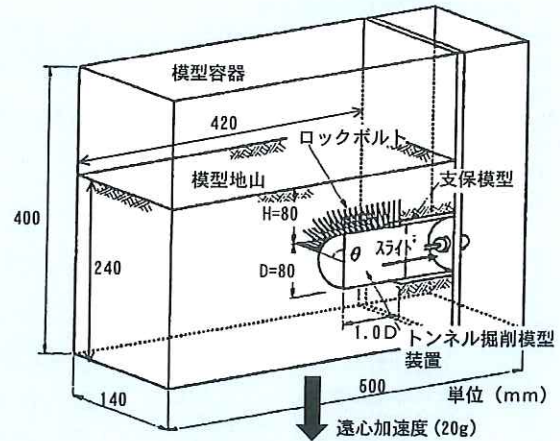


図-1 実験装置

表-1 実験材料の物性値

地山材料 (標準砂)	単位体積重量 γ_t (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

c, ϕ は一面せん断試験により求めた。(垂直応力 2.9~14.7kN/m²)

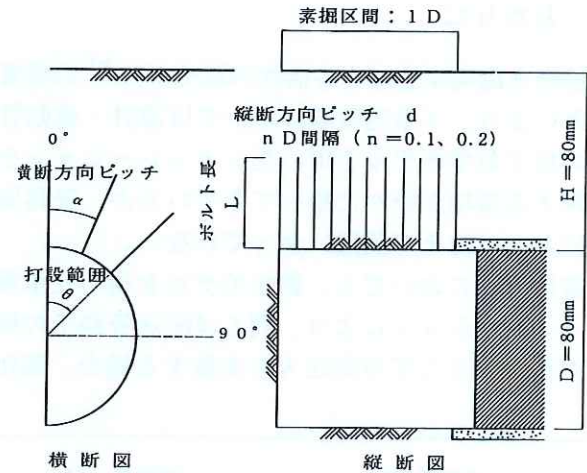


図-2 ボルト配置図

取り外し、所定の位置に挿入する。図-2にロックボルトの配置図を示す。③所定の遠心加速度(20g)まで遠心载荷を行い、その状態でトンネル掘削模擬装置を引き抜いて1.0Dの素掘区間を設け応力解放を行い、その時の地山安定状態を確認する。なお、遠心加速度の大きさは、無対策時に地山が崩壊する値を採用しており、本実験を原型に換算

すると直径 1.6m のトンネルに対応することになる。また、土被り比 H/D (H :トンネル土被り、 D :トンネル径) は 1 とし、ロックボルトは 1.6mm のりん青銅を用い、付着力を確保するため表面に砂を付着した。

実験ケースは、打設範囲： θ ($0\sim 90^\circ$ の間で変化)、ロックボルト長： L ($1.0D=80\text{mm}$, $0.5D=40$, $0.25D=20$)、横断方向ピッチ： α (22.5° , 11.25°)、縦断方向ピッチ： d ($0.1D$, $0.2D$) を変化させた場合について行った。

3. 実験結果

3.1 無対策

図-3 に無対策時の実験結果を示す。無対策では、遠心加速度 20g の状態でトンネル掘削模擬装置を引き抜くと、トンネル天端を底辺とした地表面まで達する三角錐状の崩壊が発生する。なお、トンネル掘削模擬装置の引抜きに伴う崩落状況は、引抜き開始から約 30mm (全長 80mm) の素堀区間を設けた段階で初期崩落が発生しており、その後は、引抜き量が増加するに伴い連続的に崩落範囲が広がっていた。

3.2 ボルト打設時

図-4 にボルトを打設した場合の結果の 1 例を示す。無対策時に比べ天端部の崩落が発生しておらず、ボルトに天端安定 (支保) 効果があることが分かる。

3.2.1 ボルト打設範囲の影響

天端安定効果に対する、ボルトの横断方向の配置の影響について述べる。

図-5 に、ボルト長と縦断方向ピッチを一定にした 3 種類の配置パターンで横断方向の打設本数、打設範囲を変化させた場合の実験結果 (天端安定状況) の一覧を示す。

$L = 0.25D$, $d = 0.1D$, $\alpha = 11.25^\circ$ の結果を見ると、天端付近にボルトの打設されている $\theta = 0\sim 90^\circ$ と $\theta = 0\sim 45^\circ$ のケースでは天端崩壊がほとんど発生していないが、 $\theta = 22.5\sim 67.5^\circ$ と $\theta = 45\sim 90^\circ$ では無対策と同様な天端崩壊が発生しているのが分かる。この傾向は、他の配置パターンでも見られ、 $L = 0.5D$, $d = 0.1D$, $\alpha = 22.5^\circ$ の場合は、 $\theta = 0\sim 90^\circ$ と $\theta = 0\sim 45^\circ$ では天端崩壊は表面部に限られているが、 $\theta = 22.5\sim 67.5^\circ$ や

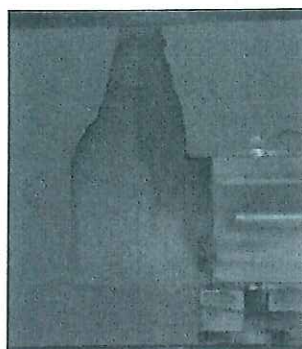


図-3 天端安定状況写真
ボルト無

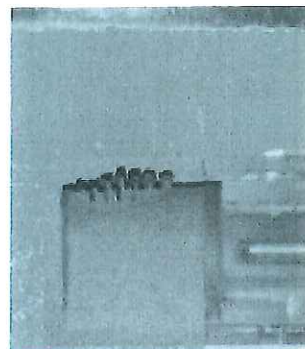


図-4 天端安定状況写真 ボルト有 ($\psi = 90^\circ$ $\theta = 0\sim 45^\circ$ $L = 0.5D$ $d = 0.1D$ $\alpha = 22.5^\circ$)

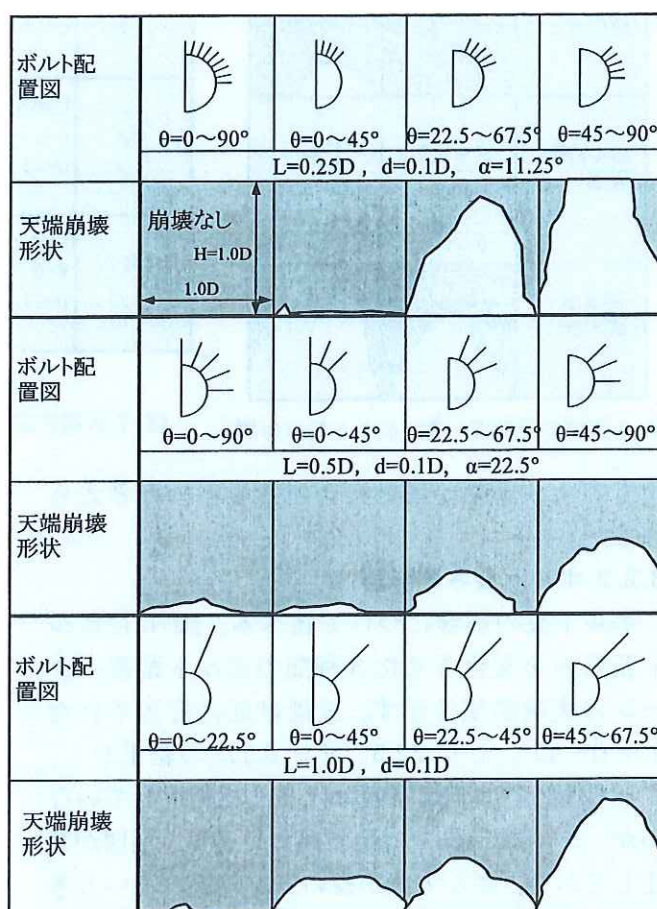


図-5 天端安定状況一覧 (打設範囲の影響)

$\theta = 45\sim 90^\circ$ のように天端付近のボルトが無くなるほど、天端安定が悪くなっている。さらに、2本を打設した $L = 1.0D$, $d = 0.1D$ ケースでも、 $\theta = 0\sim 22.5^\circ$ では、天端崩壊がおこっていないが、 $\theta = 22.5\sim 45.0^\circ$ や $\theta = 45.0\sim 67.5^\circ$ と側壁に近づくほど崩壊領域が大きくなっている。

以上の結果を総合すると、土砂地山においても、天端安定に対して、天端部 ($0\sim 45^\circ$) に打設されたボルトの方が、側壁部 ($45\sim 90^\circ$) に打設され

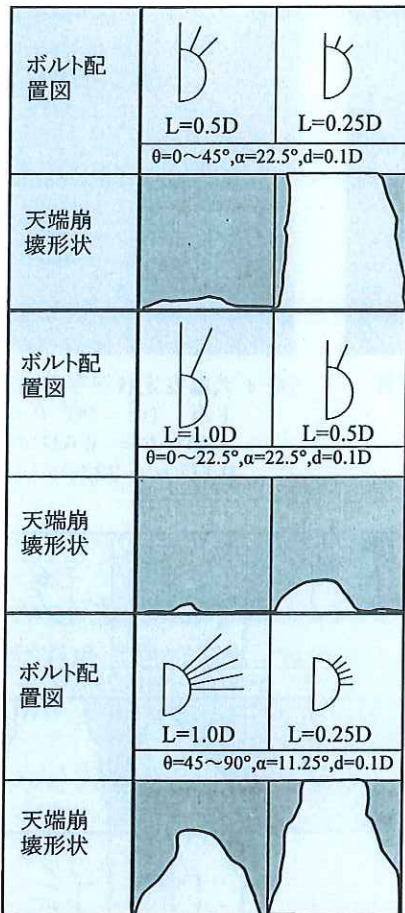
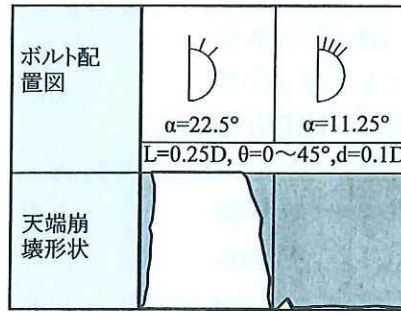


図-6 天端安定状況一覧 (ボルト長の影響)

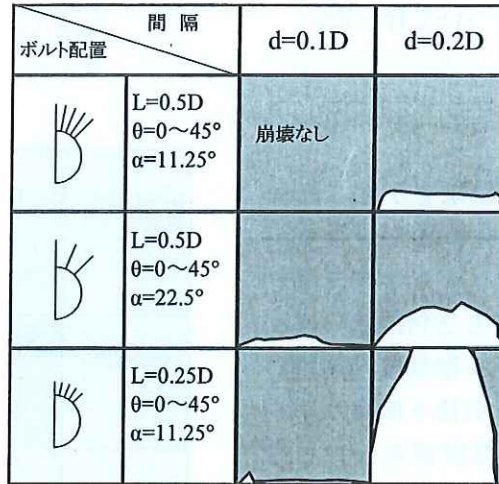
たものより効果が高い場合があるものと考えられる。

3.2.2 ボルト長さの影響

ボルト長の影響について述べる。図-6 にボルト長のみを変化させた3種類のボルト配置パターンの実験結果を示す。天端付近に打設された $\theta = 0 \sim 45^\circ$, $\alpha = 22.5^\circ$, $d = 0.1D$ の結果から、 $L = 0.5D$ では天端崩壊はほとんど発生していないが、 $L = 0.25D$ では地表面まで達する崩壊が発生しており、ボルト長が長い方が効果が高いと考えられる。しかしながら、同じく天端付近に打設された $\theta = 0 \sim 22.5^\circ$, $\alpha = 22.5^\circ$, $d = 0.1D$ の $L = 1.0D$ と $L = 0.5D$ の結果からは、 $L = 1.0D$ の方が効果は高いものの、あまり大きな違いは見られない。これらのことから、ある一定以上のボルト長があれば、必要以上に長くする必要はないと考えられる。次に側壁部分に打設した $\theta = 45 \sim 90^\circ$, $\alpha = 11.25^\circ$, $d = 0.1D$ の結果をみると、 $0.25D$ では地表面までの崩壊が生じており、さらに、ボルト長を $0.25D$ から $1.0D$ に長くしても、崩壊領域は若干小さくなるものの、天端部に打設



(a) 横断間隔の影響



(b) 縦断間隔の影響

図-7 天端安定状況一覧 (打設間隔の影響)

した結果である。 $\alpha = 11.25^\circ$ の場合は、天端崩壊は発生していないが、 $\alpha = 22.5^\circ$ では地表面まで達する崩壊が発生しているのが分かる。打設間隔を広くすると、天端安定効果が低下すると言える。図-7 (b) は、天端付近に打設した3種類のボルト配置パターンで縦断方向のピッチを変化させ場合の実験結果をまとめたものである。いずれの配置においても、縦断方向のピッチを広げると天端安定効果が低下することが分かる。

前述したように、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。しかし、打設間隔の実験結果は、施工条件などにより長いボルトが打設できない場合でも、短いボルトを横断または縦断方向の間隔を密に打設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していると考えられる。

4. 数値解析

4.1 解析方法

三次元弾塑性解析を用いて実験結果との比較を

された場合に比べてその効果は小さなものとなった。

以上のことから、ボルトが効果を発揮するためには、適切な配置を行えば、一定以上の長さがあれば十分である。しかし、効果の発揮しにくい場所に打設した場合は、ボルト長をいくら長くしてもその効果の改善はあまり期待できないと言える。

3.2.3 ボルト打設間隔の影響

ボルトの横断方向、縦断方向の間隔の影響について述べる。図-7 (a) は、天端付近 ($0 \sim 45^\circ$) に $L = 0.25D$ のボルトを横断方向の打

行った。解析手法は、非線形性が強い土砂地山を対象とするため、非線形問題、大変形問題への適用性が高いと考えられている陽解法に基づく有限差分解析法(解析コード:FALAC3D)を用いた。解析領域は、実験模型と同じとしたが、実際の計算はボルトの配置の関係もあり、横断方向のみ模型地山の倍の領域(280×420×240mm)とした。図-8にモデル図を示すが、ここでは分かり易くするため解析モデル(要素数は10080)の半分を示している。地山の破壊基準はMohr-Coulombを用いた。ロックボルトは、軸力のみ発生するケーブル要素を用いた。解析定数は実験条件と同じとしたが、粘着力については、違いがより明確に出るように若干小さな値を採用した(表-2)。なお、ケーブル要素の付着剛性、付着強度の設定方法は、仮想定着材径を3mmと考え、地山の弾性係数、粘着力などから算定した。

ここで、解析に用いたケーブル要素について簡単に説明を行う²⁾。図-9に示すように、ケーブル要素と周辺地山は、その間にある定着材のせん断剛性(Kbond)を表現するバネとその付着強度(Sbond)を表すスライダを介して連結されている。周辺地山の変形が、定着材のせん断剛性によってケーブル材にせん断応力として伝わり、ケーブル材の軸剛性に応じて軸力が発生するモデルとなっている。欠点としては、ケーブル要素自体の曲げ剛性は考慮できない点があげられる。

計算は、実験と同様にボルトを挿入した状態で、-20gをZ方向に载荷して初期応力状態を解析し、次に、図-8の着色部分を取除いてトンネル掘削を模擬した。

トンネルの天端の安定状況の判定は、最大せん断ひずみ分布と図-8に示す天端AのZ方向変位量で評価した。なお、有限差分法では、運動方程式と土の構成則をステップ毎に繰り返し、釣り合い状態を求めるため、天端が安定化する場合は、ステップの増加に伴い変位が一定値に収束して行くが、崩落するような不安定化する場合は、ステップの増加に伴い変位は収束せず発散する結果となる。このように変位の絶対値の評価に加え、その収束状況の違いを考慮して天端安定状況を判定した。

4.2 解析結果

図-10に無対策時の横断方向、縦断方向の切断

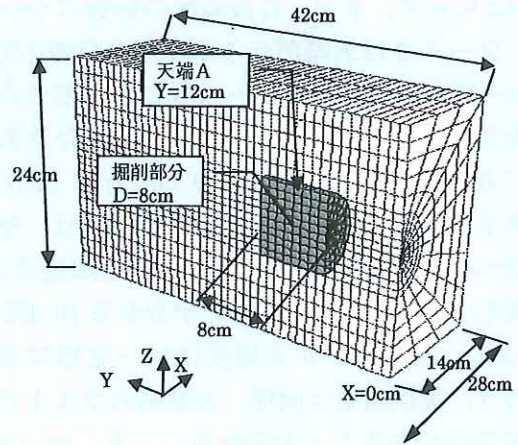


図-8 解析モデル図

表-2 解析定数

地山 (Mohr-Coulomb)	単位体積重量 r_t (kN/m ³)	15.1
	弾性係数 (Mpa)	20
	ポアソン比	0.3
	粘着力 c (kPa)	1.0
ロックボルト (ケーブル要素)	内部摩擦角 θ (deg)	34.5
	弾性係数 E (kN/mm ²)	117.6
	ボルト径 (mm)	1.6
	付着剛性 (kN/m/m)	7.67e+06
	付着強度 (kN/m)	5.03e+00

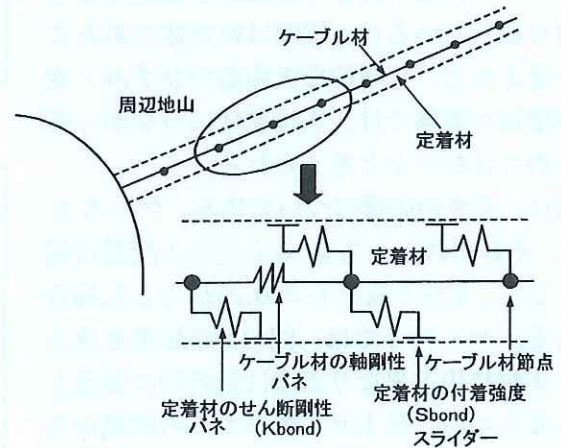


図-9 ケーブル要素モデル図

面での最大せん断ひずみの結果(全ケースとも6,000ステップ時の結果)を示す。無対策の場合は、トンネル天端から地表面に向かい、非常に大きなせん断ひずみ(22.5%以上)が発生している。また、図-11に天端AのZ方向変位量と解析ステップ数の関係を示すが、無対策の場合では、変位は一定値に収束せず最終的に発散し、実験結果と同様な天端が崩壊する結果となった。

ボルトを打設した場合の解析結果を図-11 およ

び図-12 に示す。まず、打設範囲の影響について見る。ケース 2 は天端部のみボルトを打設 (打設範囲 $0\sim 45^\circ$) した場合、ケース 3 は側壁部のみボルトを打設 (打設範囲 $45\sim 90^\circ$) した場合である ($\alpha = 1.6\text{mm}$, $L = 0.5D$, $d = 0.1D$, $\alpha = 22.5^\circ$)。ケース 2 の最大せん断ひずみの結果からは、無対策に比べ、ひずみはトンネル周辺部に限定され、その値も小さくなっていることが分かる (0.4% 程度)。また、図-11 から天端変位は一定値に収束しており、実験結果と同様、天端部のボルトに天端安定効果があることが分かる。一方、ケース 3 の側壁部のみボルトを設置した場合の結果を見ると、天端部のみを設置した場合に比べ、天端部から地表面にかけてのひずみが大きくなっている。さらに、図-11 の変位量もケース 2 に比べて大きな値となっており、天端安定効果は低くなっていることが分かる。以上より、実験結果と同様にボルトの天端安定効果が確認され、天端部のボルトの方が側壁部のボルトより効果が高いことが分かる。しかしながら、実験結果と異なり、側壁部に打設した場合も変位は最終的に一定値に収束して、天端が安定する結果となった。これは、計算では地山を連続体として取り扱っているが、実際は粒状体であることを考えると、局所的な天端部のひずみ・変位の増加が実験では、天端崩壊につながっているのではないかと考えられる。

次に、長さの影響について見る。ケース 4、5 は、それぞれケース 2、3 とボルト配置は同じとして、ボルト長を $L = 0.25D$ とした場合である。ケース 4 では、図-11 の結果を見ると、実験結果と異なり天端は最終的に安定しているものの、最大せん断ひずみの結果からは、天端部のひずみ範囲が、ケース 2 に比べ、より上方へ広がっていることが分かる。さらに、側壁部のケース 5 の場合は、ケース 3 に比べ、急激にひずみが増加しており、図-11 の変位も収束せず、不安定化していることが分かる。以上のように、両比較ともボルトが長い方が地山安定効果は高いとの実験結果と一致した。さらに、ケース 4、5 の比較からも天端部のボルトの方が、側壁部のボルトより地山安定効果が高いことが分かる。

最後に、打設間隔の影響を見る。ケース 6

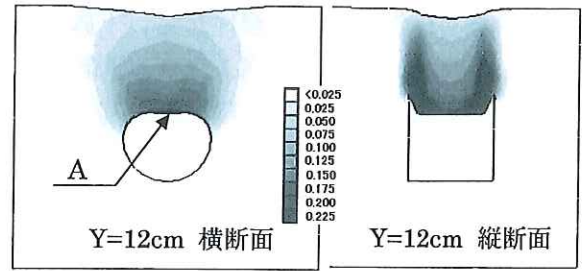


図-10 最大せん断ひずみ図 (無対策)

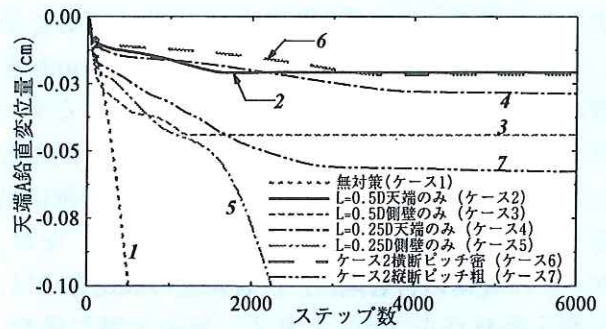
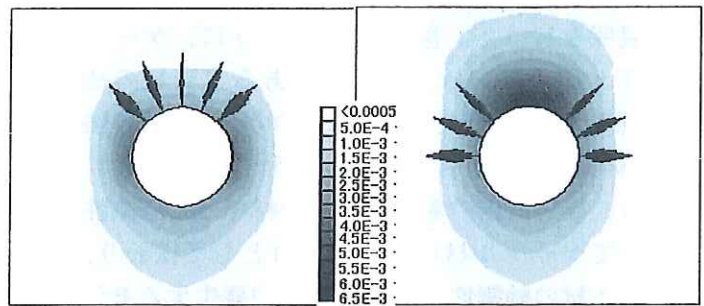
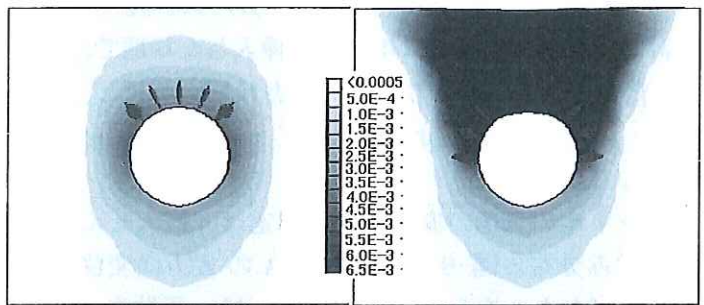


図-11 天端変位と解析ステップ数の関係



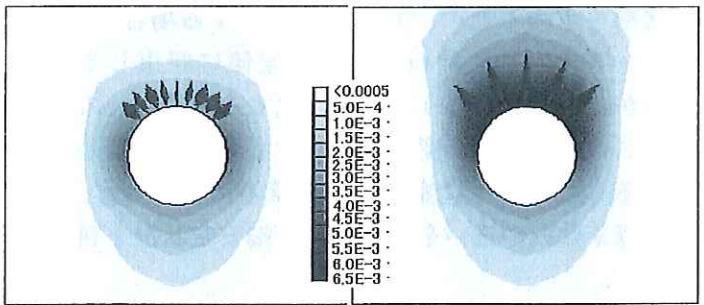
(a) ケース 2

(b) ケース 3



(c) ケース 4

(d) ケース 5



(e) ケース 6

(f) ケース 7

図-12 最大せん断ひずみ図 (ロックボルト有)

は、ケース4の横断方向のピッチを $\alpha = 22.5^\circ$ から $\alpha = 11.25^\circ$ にした場合、ケース7は、ケース2の縦断方向を $d = 0.1D$ から $d = 0.2D$ にした場合(ケース7)である。両ケースとも天端は安定する結果となった(図-11参照)。しかし、最大せん断ひずみ図を見ると、ケース6では地表面付近のひずみ範囲がケース4に比べ、若干ではあるが小さくなっている。さらに、図-11の変位量も小さくなっていることが分かり、横断方向のピッチを密にすると安定性が向上すると言える。また、縦断方向のピッチを広げたケース7は、天端部のひずみ、変位ともケース2に比べ増大しており、逆に安定性が低下していることが分かる。以上のように、打設間隔に関しても、実験結果と同様な傾向を示した。

5. 結論および今後の考察

ここでは、低土被りの土砂地山でのロックボルトの支保効果を確認し、その適切な配置、必要長さなどを調べるため遠心載荷模型実験および数値解析を実施した。その結果以下の知見が得られた。

- (1) 実験結果より、天端部に打設されたロックボルトの方が、側壁部に打設されたロックボルトより、天端安定(支保)効果に対して大きく寄与していることが明らかになった。
- (2) 実験結果より、ロックボルト工が効果を発揮するためには一定以上の長さがあれば十分であるが、ボルト長が短い場合でも、横断、縦断方向を密に打設することで効果が期待できる場合があることが明らかになった。
- (3) 数値解析では、大変形解析が可能な解析手法を用い、最大せん断ひずみと天端変位および変位の収束状況により地山の安定性を判定したが、解析結果は実験結果と定性的に一致しており実験結果の妥当性が検証できた。

なお、これまでの実績では、低土被り地山や土砂地山においては、ロックボルトの軸力の計測結果などから、天端部にロックボルトを配置しない場合が多かった。一見これらの実績と実験結果は整合性に欠ける。しかし、これは打設時期の違いや吹付コンクリート、鋼製支保工など他の支保部材との分担の影響によるものと考えられる。特に

打設時期の影響は大きく、実験では打設箇所の応力が解放される前にロックボルトが打設されているが、実際の現場においては、ある程度応力が解放されて天端部の共下がり現象が発生した段階で打設される場合がある。そのため、天端部のロックボルトにあまり軸力が現れないのではないかと考えられる。したがって、逆に、応力解放が進んでいないなるべく早期にボルトを設置した場合は、低土被りでも実験結果と同じように、天端部のロックボルトに天端安定効果を期待することは可能であると考えられる。例えば、先進導坑からの補強ボルトや既設トンネル改築に際して覆工取壊し前に既設トンネル内部から事前に打設されたボルトなどである。

今後は、掘削による応力解放程度の違いによってロックボルトの効果がどの程度影響を受けるかについて検討したいと考えている。

参考文献

- 1) 土木学会：トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説, pp.79-80, 平成8年版
- 2) Itasca Consulting Group, Inc. : Flac3D ver2.0 User's Manual, 1997.

蒲田浩久*



独立行政法人土木研究所
基礎道路技術研究グループ
トンネルチーム
主任研究員
Hirohisa KAMATA

真下英人**



同 基礎道路技術研究グループ
トンネルチーム
上席研究員, 工博
Dr. Hideto MASHIMO