

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

A fundamental study on the effect of rock bolts in sandy ground

蒲田浩久¹⁾・真下英人²⁾・長谷川哲也³⁾

Hirohisa KAMATA, Hideto MASHIMO and Tetuya HASEGAWA

In order to clarify the effect of rock bolts on tunnel stability in sandy ground, centrifugal model tests have been carried out so far. In this paper, experiments were performed especially on the effect of the inclined rock bolts. Also, the experimental results obtained so far were compared with the numerical results using 3D-FDM. The experimental results show that rock bolts installed with a certain inclination to the horizontal in the longitudinal section take the same effect as the rock bolts installed in the direction normal to the tunnel wall if the rock bolts with a certain length are installed with enough spacing density. It is also shown that experimental results can be simulated using 3D-FDM.

Key Words : shallow tunnel, sandy ground, rock bolt, centrifugal model test, 3D-FDM

1. はじめに

NATM工法においては、支保部材としてロックボルトが使用されている。しかしながら、その効果に関しては、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提案されているものの、未だ不明な点が多く、適切な配置、長さなど明らかにされていない点が多い。特に低土被りの未固結地山や破碎帯などの軟弱層でのロックボルト工の効果や核無し掘削を採用した時に作業上の制約から少し斜めにロックボルトを打設して支保効果と切羽前方の安定効果（先受）の両方を期待する場合の効果の違いなど、より明確化し合理的な設計法の確立が必要である。

これまで著者ら¹⁾は、土砂地山を対象にした遠心載荷実験により、天端付近に打設されたロックボルトが地山（天端部）安定効果に寄与する場合があることを明らかにした。本研究では、トンネル進行方向に対する打設角度（斜めボルト）の天端安定効果に対する影響を明らかにするため遠心載荷実験を行い、さらに、これらの実験結果の妥当性を検証をするため、3次元FDM（有限差分法）を用いた数値解析を行った。

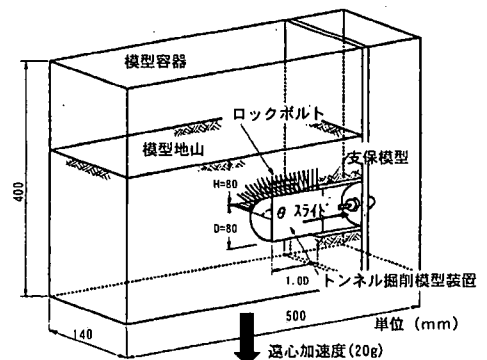


図-1 実験装置概要図

2. 実験方法

実験装置は、内寸 140×500×400 の模型容器に、アクリル製

- | | | | | | |
|----|-----|----|--------|-------|---------------------------|
| 1) | 正会員 | 工修 | 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) |
| 2) | 正会員 | 工博 | 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) |
| 3) | 正会員 | | 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) 交流研究員 |

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 ($D=80\text{mm}$) のトンネル掘削模擬装置が設置してある。実験は、模型地山にロックボルトとトンネル模型を設置し、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 $1.0D$ の素堀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した。模型地山は、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 毎に締め固めて作成した。表-1 に物性値を示す。なお、土盛り比 H/D (H :トンネル土盛り、 D :トンネル径) は 1 とした。

ロックボルトは表面に砂を付着させた 1.6mm のりん青銅を用い、地山作成後に前面のアクリル板を一旦取り外し、トンネル掘削模擬装置を引き抜き、地山を素堀状態にして、所定の位置に挿入した。図-2 にロックボルトの配置図を示す。

実験ケースは、打設範囲 θ を $0\sim 45^\circ$ に固定して、ロックボルトの長さ L ($40, 20\text{mm}$)、横断方向ピッチ α (22.5° 、 11.25°) を変化させた3つの横断配置パターンについて、斜め打設角度 ψ を $90\sim 15^\circ$ まで、縦断方向のピッチ d を $0.1D$ 、 $0.2D$ と変化させた場合について行った。なお、これまでの実験結果より、肩部から上方に打設されたボルトの方が側壁部に打設されたボルトより天端安定に高い効果あることが分かっているため打設範囲 θ を上記のように固定した。

3. 実験結果

(1) 無対策時

図-3 に無対策時の実験結果を示す。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にまで達する三角錐状の天端崩壊が発生した。

(2) ボルト打設時

図-4 は、天端部にロックボルトを、打設角度、長さ、配置間隔などを変化させて打設した場合の、天端崩壊図をまとめたものである。(a)の $\psi=90^\circ$ (以下、直ボルトと呼ぶ) の結果を見ると、無対策時の結果に比べ天端崩壊は発生せず、天端部のロックボルトには、天端安定効果があることが分かる。

次に斜めに打設した場合の打設角度の影響について見てみる。全体に打設角度を小さくすると天端安定が悪くなる傾向があることが分かる。この結果から、天端を安定させるためにはある程度の角度が必要であると考えられる。この点について詳細に見てみる。 $\psi=75^\circ$ までは、すべての配置パターンにおいて、直ボルトとほぼ同程度の天端安定効果が得られることがわかる。さらに、 $L=40\text{mm}$ 、 $\alpha=22.5^\circ$ ((e)~(i)) の結果から、ある長さ以上のボルトを密にして打設すれば、 $\psi=30^\circ$ 程度までは斜めにしても直ボルトと同程度の効果が発揮される場合があることがわかる。

斜めに打設した場合のボルト長および縦断方向のピッチの影響について見てみる。ボルト長だけ異なる(c) ($L=40\text{mm}$ 、 $\alpha=11.25^\circ$ 、 $0.2D$ 、 $\psi=75^\circ$) と(p) ($L=20\text{mm}$ 、 $\alpha=11.25^\circ$ 、 $0.2D$ 、 $\psi=75^\circ$) の結果から、天端安定効果を発揮するためには、ある程度の長さが必要であることが分かる。縦断方向のピッチについてはすべての配置パターンにおいて縦断方向の間隔を狭くすることで天端の安定性が向上していることから、斜めに打設せざるを得ない場合は、

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

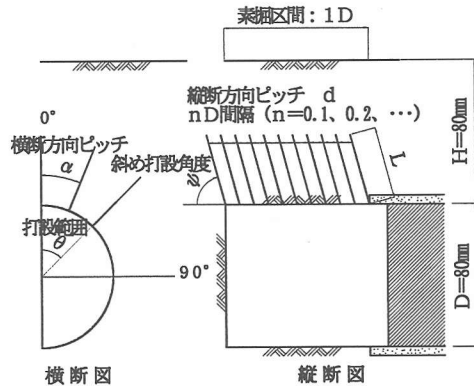


図-2 ロックボルト配置図

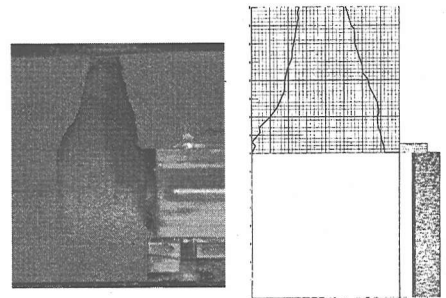


図-3 天端崩壊写真および同崩壊図(無対策時)

縦断方向を密に打設する必要があることが分かる。

以上の結果を総合すると、ロックボルトにより地山安定を図るためにはトンネル壁面に直角に打設するのが最も効果的であるが、作業空間などの関係上、直角にロックボルト打設できない場合には、ボルトを長くし、縦断方向に密に打設することで、斜めに打設しても直ボルトと同程度の効果を確保できる場合があるものと考えられる。

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模型地山の倍の領域（280×240×420）のモデルとした。図-5 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の半分を示している。要素数は10080である。地山の破壊基準は Mohr-Coulomb を使い、ロックボルトは、軸力のみ作用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、付着強度は、仮想ケーブル径(3mm)を考え、ケーブル材として地山物性値を用いて算定した。

計算は、-20g を Z 方向に載荷して初期応力状態を解析し、次に初期応力状態から実験と同様に図-5 の着色部分を取除いてトンネル掘削を模擬した。ロックボルトのあるケースは、初期応力解析後の状態にロックボルトを設置し、その後トンネル掘削を行った。

トンネルの安定状況の違いは、図-5 に示す天端 A の Z 方向の変位量の大きさで判定できる。さらに、有限差分法では、運動方程式と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、安定化する場合（釣り合い状態の存在する場合）は、ステップの増加に伴い変位が一定値に収束して行く。一方、崩落するような不安定化する場合、ステップの増加に伴い変位は収束せず発散する方向に進む結果となる。このように収束状況の違いによっても天端安定状況の違いが判定できると考えられる。以上のように、絶対変位量及び収束状況の両方によって天端安定状況

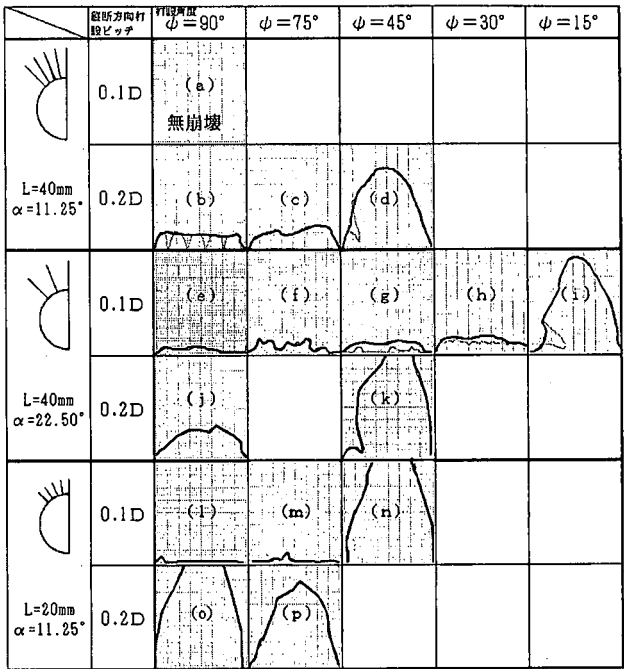


図-4 天端崩壊図（ロックボルト設置時）

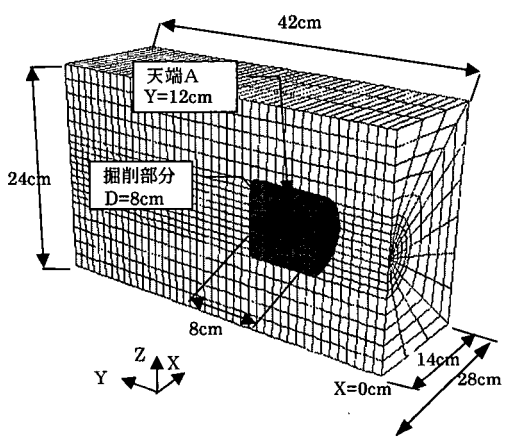


図-5 解析モデル図

表-2 解析定数

地 山 (Mohr-Coulomb)	単位体積重量 γ_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
	内部摩擦角 ϕ (deg)	34.5
ロックボルト (ケーブル要素)	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+03
	付着強度 (kN/m)	5.03e-03

を評価した。

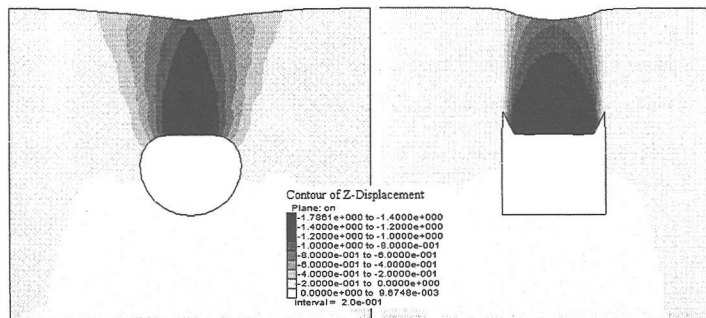
4. 2 解析結果

(1) 直ボルトの効果について

著者ら¹⁾がこれまで行ってきた地山安定効果に対する、ボルトの配置の影響に関する実験結果を確認するために、無対策時（ケース1）、天端部のみボルト打設（ケース2：実験ケース(e)に対応）、側壁部のみボルト打設（ケース3）について計算を行った。ロックボルトは $\phi=1.6\text{mm}$ $L=40\text{mm}$, $\alpha=22.5^\circ$ $d=0.1\text{D}$ で、ケース2は打設範囲 $0\sim 45^\circ$ 、ケース3は打設範囲 $45\sim 90^\circ$ とした。図-6にそれぞれのケースの解析結果（Z変位等高線図）を示しているが、それぞれの結果は横断方向と縦断方向での切断面で表示し、さらに、ロックボルトのあるケースは、その軸力分布結果を示している。収束状況を見るため、図-7に天端AのZ方向変位量と解析ステップ数の関係を示している。

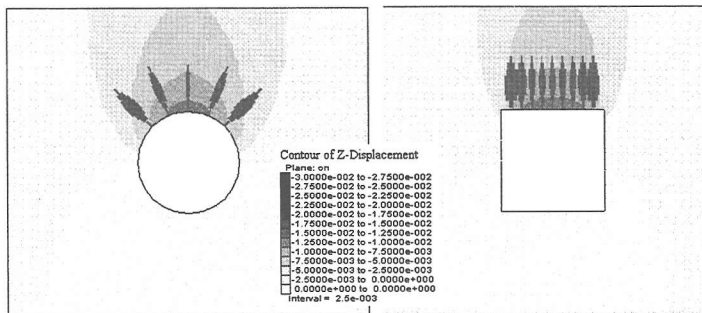
無対策時は、図-6(a), (b)から実験結果と同じように天端部が大きく変形していることが分かる。図-7からも、一定に収束せず発散しているのが分かり、無対策では、天端が崩壊する状況が発生している。次に、図-6(c), (d)から、天端部のみロックボルトを設置した場合、天端変位が無対策時に比べ大きく抑制され、図-7からも天端変位は収束し安定していることが分かる。実験結果と同様、天端部のロックボルトに地山安定効果があることが分かる。一方、側壁部のみロックボルトを設置した場合も、実験結果では崩壊したが、解析結果では、図-6(e), (f)及び図-7の収束状況から、地山安定効果があることが分かる。ただし、ケース2と比べると天端変位量は大きく、加えて、かなり局所的に変位が発生しており、天端部に打設したロックボルトの結果に比べると、効果は小さいと言える。また、実際は地山が粒状体であることを考えると、この部分の変位増加が実験では、天端崩壊につながる場合もあるのではないかと考えられる。

次に、長さの効果を見るため、配置は同じとして、ボルト長



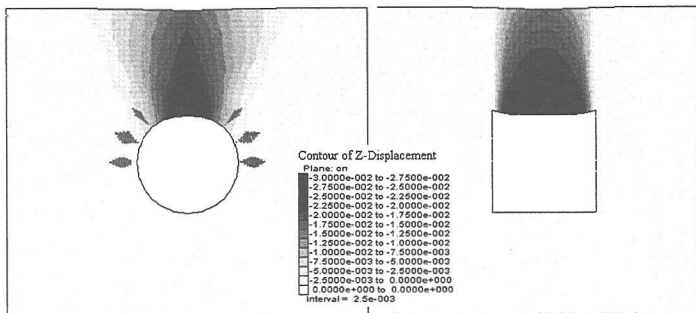
(a) Y=12cm 横断面(ケース1)
(XZ 平面)

(b) X=0cm 縦断面(ケース1)
(YZ 平面)



(c) Y=12cm 横断面(ケース2)

(d) X=0cm 縦断面(ケース2)



(e) Y=12cm 横断面(ケース3)

(f) X=0cm 縦断面(ケース3)

図-6 Z 変位等高線図

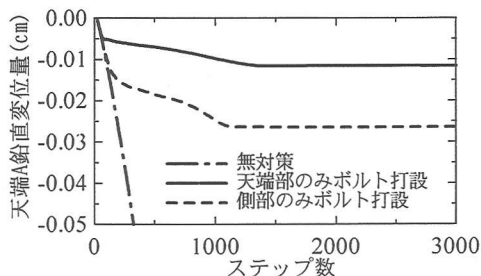


図-7 天端変位と解析ステップ数の関係
(直ボルトの配置の影響)

を $L=20\text{mm}$ とした場合の天端部のみ打設（ケース4）、側壁部のみ打設（ケース5）の計算を行った。図-8、9にケース4、5の結果をそれぞれ示す。ケース4の変位は最終的に収束し安定した。しかしケース2に比べ天端変位は大きくなっており、ボルトが長い方が地山安定効果は高いとのこれまでの実験結果と一致した。一方、ケース5では、天端変位は収束せず、地山は安定化しなかった。この結果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。

(2) 斜めボルトの効果について

斜めボルトの効果を確認するため、ケース2($\theta=0\sim45^\circ$, $L=40\text{mm}$, $\alpha=22.5^\circ$, $d=0.1\text{D}$)と同じ配置で、斜め打設角度 ψ を $75, 45, 30^\circ$ と変えた場合の計算を行った。それぞれ実験ケース(f), (g), (h)に対応している。図-10~12は、それぞれに対応した解析結果($X=0\text{cm}$ 縦断面)、図-13は、天端AのZ変位量と解析ステップ数の関係を示している。

図-10から $\psi=75^\circ$ では、図-6(d)の $\psi=90^\circ$ の結果と比較して、ボルト軸力がやや左右非対称となっているが、天端変位量もほぼ同じく地山は安定した。図-13の収束状況からも、 $\psi=90^\circ$ とほぼ同じになっているのが分かる。図-11の 45° の場合は、さらに、ボルトの軸力分布・変位分布が非対称形となったが、図-13から分かるように最終的には収束し地山は安定した。一方、 $\psi=30^\circ$ まで傾斜させると、図-12から急激に変位が大きくなり、一部のボルトに圧縮応力が発生しているなど地山が不安定しているのが分かる。さらに、図-13からも天端変位は、収束していないことが分かる。これらの結果は、実験結果の直ボルトが最も地山安定効果が高く傾斜するに従いその効果は下がる傾向と一致している。また、実験結果では $\psi=30^\circ$ （図-4(h)）まで安定化し 15° で不安定化したのが、数値解析においても、 45° から 30° で急激に地山安定効果無くなる傾向が再現された。

次に、ボルトの長さや縦断面方向のピッチと影響を見るためケース7($L=40\text{mm}$, $d=0.1\text{D}$, $\theta=0\sim45^\circ$, $\alpha=22.5^\circ$, $\psi=45^\circ$)のボルト長 $L=20\text{mm}$ としたケース9および縦断面方向のピッチを $d=0.2$

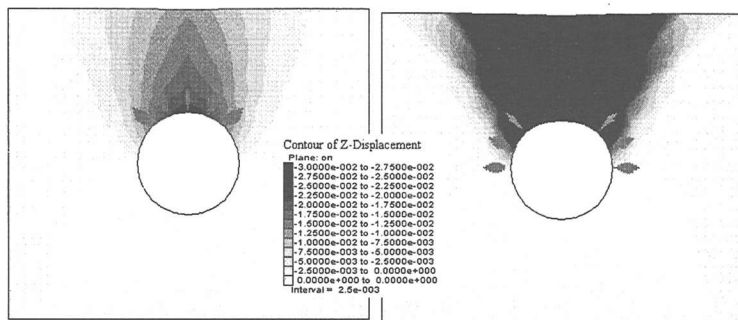


図-8 Z変位等高線図(ケース4)
Y=12cm 横断面

図-9 Z変位等高線図(ケース5)
Y=12cm 横断面

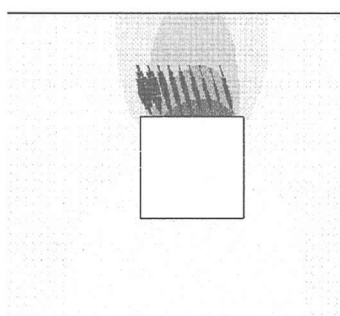


図-10 Z変位等高線図
($\psi=75^\circ$ ケース6) X=0cm 縦断面

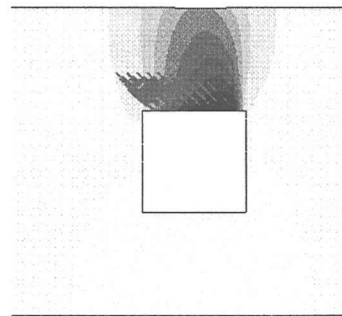


図-11 Z変位等高線図
($\psi=45^\circ$ ケース7) X=0cm 縦断面

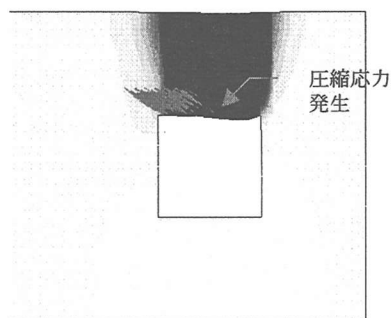


図-12 Z変位等高線図
($\psi=30^\circ$ ケース8) X=0cm 縦断面

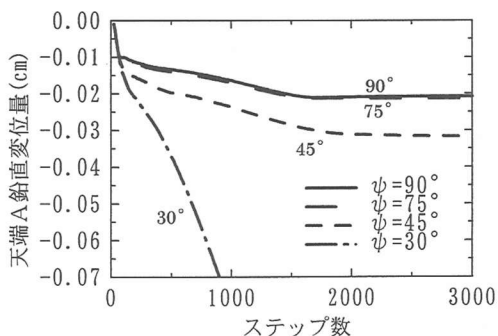


図-13 天端変位と解析ステップ数の関係
(斜めボルト効果)

Dとしたケース10（実験ケース(k)に対応)を計算した。図-14、15にケース9、10の結果を示している。図-16は、天端AのZ変位量と解析ステップ数の関係を示している。これらを見ると、どちらのケースも図-11のケース7の結果に比べ、天端変位が大きくなっており、さらに、図-16からも天端変位は収束せずに発散していくことが分かる。この結果より、ボルト長を短くすること、縦断方向のピッチを広げることは、それぞれ地山を不安定化させることになることが分かり、実験結果と同様な傾向となった。

5. 結論

本研究では、天端部のロックボルトに関して、トンネル進行方向の打設角度の影響を明らかにすることを目的とした遠心載荷実験および実験結果と比較するため三次元弾塑性解析（FDM）を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

(1)実験結果より、地山（天端）安定効果は、直ボルトが最も高い

ことが分かった。しかしながら、配置や長さを適切に設定することにより、斜めボルトでも直ボルトと同程度の地山安定効果が期待できる場合があることが明らかになった。

(2)数値解析により、天端部のみに打設された直ボルト（打設角度=90°）の地山安定効果をシミュレーションすることができた。さらに、解析では、側壁部にのみ打設された直ボルトでも、天端部のみの打設より効果は低いものの、地山安定効果があることが示された。また、斜めボルトに対する解析結果では、ボルトの打設角度が小さくなると地山安定効果が小さくなること、ある角度より小さくなると急激に効果が期待できなくなることなど、実験結果と同じ傾向を再現することができた。

6. おわりに

土砂地山においては天端部のボルトを配置しない場合がこれまでの実績では多く、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、鋼アーチ支保工など他の支保部材との分担の影響が大きいものと考えられる。特に打設時期については、実験では打設箇所の応力が解放される以前に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ているために、天端部のボルトにあまり効果が現れない場合が多いと考えられる。したがって、応力解放が進んでいない早期の段階でボルトを設置した場合は、天端部のボルトに地山安定効果を期待することは可能で、例えば、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は、天端の安定効果が期待できるのではないかと考えている。

参考文献

- 1) 鈴木正彦・真下英人・高根 努・藤井邦男：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、トンネル工学研究論文・報告集第9巻、P143-148, 1999.

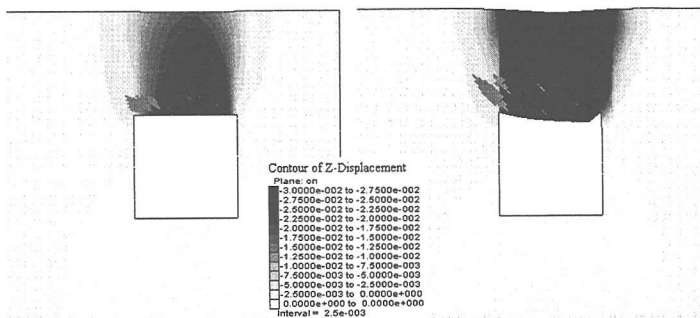


図-14 Z方向変位図（ケース9）
（X=0cm 縦断図）

図-15 Z方向変位図（ケース10）
（X=0cm 縦断図）

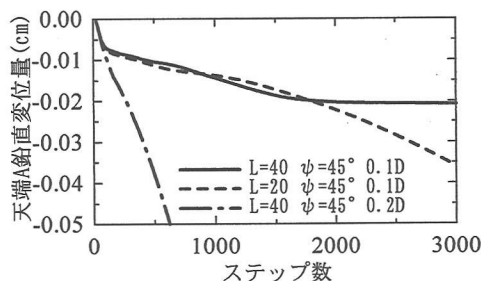


図-16 天端変位と解析ステップ数の関係
（斜めボルトの縦断ピッチ、長さの影響）