

◆ 特集：道路の機能向上に資する技術開発 ◆

既設トンネル断面拡大時の支保構造

— ロックボルトに着目して —

蒲田浩久* 真下英人** 森本 智***

表-1 ロックボルト工および補助工法実績一覧表

トンネル	活線状態	地山等級	距離 (m)	最大土被り (m)	掘削工法とロックボルト	補助工法
A	○	D	126	20	NATM工法(側壁導坑先進) ボルトなし	全線フォアボーリング
B	○	D	40	9	在来工法(中段導坑先進)	地山改良工(天端部)
C	○	D	80	15	NATM工法(3分割施工) パターンボルト(人力施工+継ぎボルト)	坑口部フォアボーリング
D	○	D	124	30	NATM工法(側壁導坑先進) ボルトなし	全線フォアボーリング
E	○	D	107.5	30	NATM工法(上半先進) パターンボルト(人力施工+継ぎボルト)	先行ボルト(天端部)
F	○	D~CL	56	23	NATM工法(上半先進) 側壁部のみロックボルト設置	フォアボーリング
G	△	D~CL	55	20	NATM工法(上半先進) 側壁部のみロックボルト設置	フォアボーリング
H	○	D	97	40	NATM工法(不明) 天端部 L = 3.0m, 40° 斜め打ちボルト	先行ボルト(天端部)
I	△	D	97.5	50	在来工法(上半先進) 在来工法のためボルトなし	特になし

○：活線, △：部分停止

1. はじめに

近年、車両の大型化、交通需要の増大などに伴い既設トンネルの断面を拡大する必要が高まってきているが、拡大したトンネルの支保構造については力学的に不明な点が多いために新設トンネルの考え方に準拠して設計を行っているのが現状であり、地山状況、覆工状況、施工性など断面拡大固有の特徴を考慮した合理的な支保構造が求められている。

これまでの断面拡大トンネルの支保構造(鋼製支保工、吹付けコンクリート、ロックボルト)を調査した結果、支保構造の中でもロックボルトに関しては、新設と同様に地山に直角にパターンボルトを打設した事例はそれほど多くなく、施工性から新設に比べ変則的パターンを採用してきた事例が多い(表-1)。例えば、上半先進工法の場合は、側壁部のロックボルトのみで天端部を省略したり、斜めロックボルトを採用したりしている事例があり、側壁導坑先進工法の場合には、天端部も側壁部もロックボルトを打設していない事例などもある。さらに、パターンボルトを採用したトンネルでも施工空間が狭いため、人力施工で継ぎボルトになるため非常に苦勞したと報告されている。また、補助工法に関して、既設トンネル覆工取り壊し前に、既設トンネルの天端部にロックボルトを打設する事例(先行ボルト)があるが(表-1)、新設トンネルと異なり、既設トンネルの天端部の地山はゆるんでいる場合が多く、ボルト長の決め方など設計上不明な点が残されている。このようにロックボルトに関して、その効果のメカニズムを明らかにして、合理的な設計を行うことは、断面拡大トンネルの支保設計をする上で特に重要であると考えられる。このため、本研究で

は、ロックボルトに着目して、作業上の制約からトンネル進行方向に対して斜めにロックボルトを打設する斜めボルトの支保効果を遠心力載荷模型実験により明らかにするとともに、ゆるみ域とロックボルトの支保効果の関係について落戸実験により調べた。

2. 斜めボルトの支保効果

2.1 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)まで遠心載荷を行い、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ことで、ロックボルトの支保効果を調べた。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-2に物性値を示す。なお、土被り比H/D(H:土被り、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

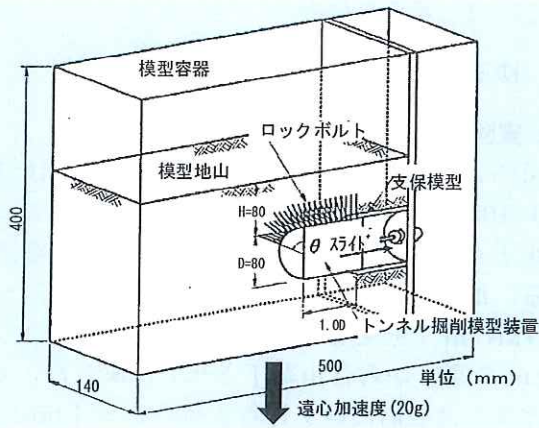


図-1 実験装置

表-2 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 2.9~14.7kN/m²)

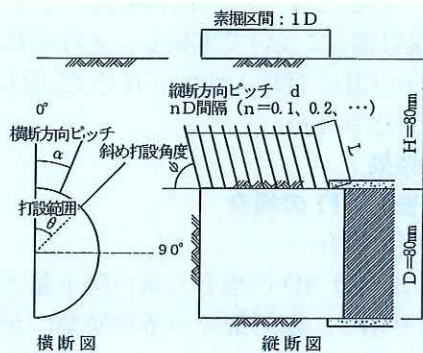


図-2 ボルト配置図

のりん青銅を用い、地山作成後に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、前面の亚克力板を一旦取り外し、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。

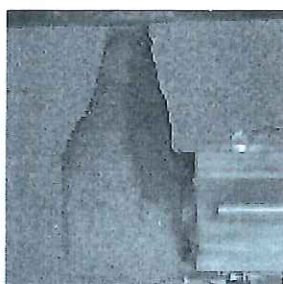
実験ケースは、打設範囲 θ を 45° に固定して、ロックボルトの長さ L (0.5D, 0.25D)、横断方向ピッチ α (22.5°, 11.25°) を変化させた3種類の横断配置パターンについて、斜め打設角度 ψ (90~15°)、縦断方向ピッチ d (0.1D, 0.2D) を変化させた場合について行った。さらに、投影長さの影響を見るため打設角度 90° で、ロックボルト長さを変化させたケースについて行った。なお、これまでの実験結果¹⁾ から、肩部から上方に打設されたボルトの方が側壁部に打設されたボルトより天端安定に高い効果あることが分かっているため打設範囲 θ を 45° と固定した。

2.2 実験結果

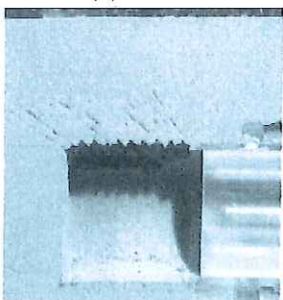
写真-1 (a) に無対策時、(b) に天端部にロックボルトを $\psi = 45^\circ$ で打設した時の実験結果を示す。無対策では、遠心加速度 20g の状態でトンネル掘削模擬装置を引き抜くと、トンネル天端を底辺とした地表面にまで達する三角錐状の天端崩壊が発生している。一方、斜めボルトを打設した場合は天端崩壊は発生せず、支保(天端安定)効果があることが分かる。図-3 は、斜めの打設角度、横断方向の配置等を変化させた一連の実験結果(天端部崩壊状況のスケッチ図)をまとめたものである。これを見ると、全体に打設角度を小さくする(斜めに打設する)と天端安定が悪くなる傾向があることが分かる。この結果から、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が、(d)~(h)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、 $\psi = 30^\circ$ 程度までは斜めに打設しても直ボルトと同程度の支保効果が発揮される場合があることがわかる。

次に、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。(f) と (n) の結果を比較すると、



(a) 無対策



(b) 斜ボルト

写真-1 天端崩壊状況

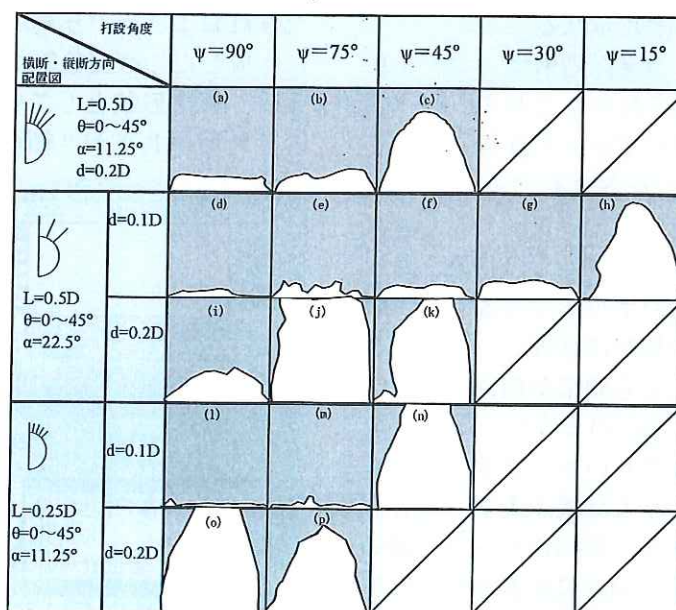


図-3 天端状況図一覧(斜め打設角度および配置)

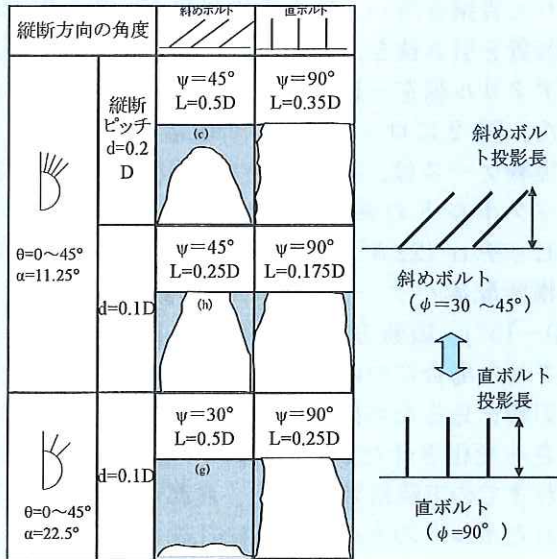


図-4 天端状況図一覧
(投影長が等しいボルトの比較)

横断方向のボルト本数が少ないにも関わらず、ボルト長の長い方 (f) が天端が安定していることから、ボルト長が長い方が効果的であると言える。また、縦断方向のピッチについてもそれぞれ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、縦断方向を密に打設すると支保効果が向上することがわかる。以上の結果を総合すると、同じ長さのロックボルトにより天端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、ボルトを長くすることや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天端安定 (支保) 効果を確認できる場合があるものと考えられる。

ところで、斜めボルトの支保効果は、ボルト直角方向の投影長さで評価されることが多いが、それを検証するために、斜めボルトの直角方向の投影長さとほぼ等しくなる長さを有するボルトをトンネル壁面に直角に打設 ($\psi = 90$) する実験を行った。その結果を図-4 に示す。この結果を見ると、(c), (h) のように斜めボルトで天端効果が期待できない場合は、投影長がほぼ等しいロックボルトを直角方向に打設しても効果が期待できないことがわかる。さらに、(g) のように、斜めボルトの方が、投影長がほぼ等しいロックボルトを直角方向に打設した場合よりも効果が大きい場合も見られる。以上のことから、斜めボルトの支保効果は、斜めボルトの直角方向の投影長さがほぼ等しいロックボルトをトンネル壁面に直角方向に打設した場合とほぼ等しいか、やや大きいと評価で

きるものと考えられる。

3. ゆるみ域でのロックボルトの効果

3.1 実験方法

図-5 に実験装置を示す。矩形の落戸模型 (B: 300 × D: 100 × T: 250 (mm)) は、地山作成後にロックボルトが打設出来るよう側部に開口部を設けている。地山材料は乾燥状態にある珪砂 4 号 ($\gamma = 15.7\text{kN/m}^3$) を使用し、密度が一定となるように 10cm の高さから自由落下させて作成した。ロックボルトは表面に砂を付着させた $\phi = 1.6\text{mm}$ のリン青銅丸棒を使用し、縦断方向 8 列 (30mm 間隔) 横断方向 5 列 (18mm 間隔) を配置した。実験は、①地山作成直後に無対策で落戸を降下させるケース (無対策) ②地山作成直後にボルトを設置して、落戸を降下させるケース (降下前打設) ③無対策状態である程度落戸を降下させ、地山にゆるみを与えた後、降下床を一旦停止した状態でロックボルトを打設して、その後再度降下させるケース (降下後打設) について実施し、それぞれについて、土被り (3D, 1D)、ボルト長さ (1.0D, 1.5D, 2.0D) を変化させた。

3.2 実験結果

3.2.1 土被り 3D の場合

(1) 無対策の場合

図-6 に土被り 3D の場合の落戸降下量と落戸荷重の関係を示す。無対策での落戸模型にかかる荷重は降下開始後すぐに減少して、降下量約 3mm で最小荷重を示し、それ以降はほぼ一定値となった。図-7 は降下前と 20mm 降下後の写真を重ねた写真およびその写真から読み取ったデータを基に作成した鉛直変位等高線図 (2mm ピッチ) であるが、最終形状として幅 10cm、高さ 10cm 程度の三角形の共下がり領域 (落戸とほぼ同じ量だけ

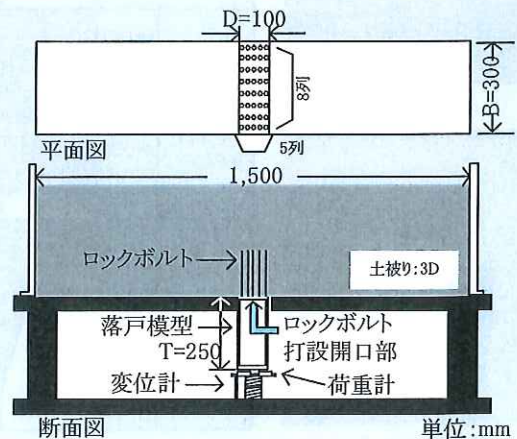


図-5 実験装置

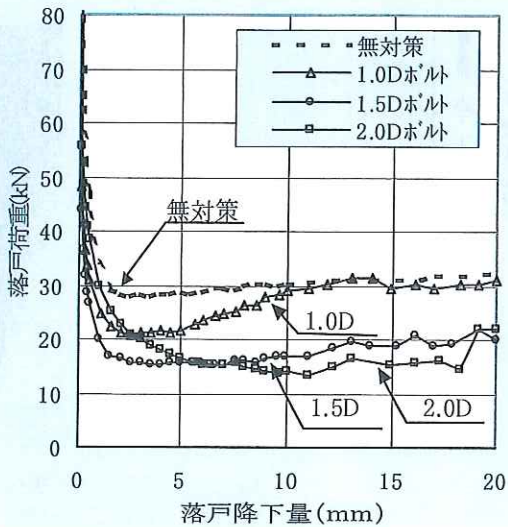


図-6 荷重降下量曲線 (土被り 3D 降下前打設)

沈下する領域) が形成されているのが確認できる。次に、その形成過程を見てみる。図-8 は、各降下量毎の画像より求めた無対策時の落戸降下量と模型中央での各深さ (H: 落戸からの距離 (cm)) の沈下量の関係を示す。なお、この図で直線の傾きが 45° に近いほど、地山が落戸と共下がりをしていることを意味している。地山は荷重が一定値となる降下量 3mm 付近から、落戸と共下がりしようとする領域 (H=0~10cm) とアーチ効果により自立しようとする地表面側の領域 (H=17.5~30cm) に分かれていくことがわかり、この分離過程により三角形が形成されたと言える。なお、ゆるみ域の定義は明確にされていないが、本研究においてはこの共下がり領域がゆるみ領域に相当するものと考えた。

(2) 降下前打設のロックボルトの効果

落戸降下前にロックボルトを打設することで、

共下がり領域 (ゆるみ域) がない状態に打設した場合 (降下前打設) のロックボルトの効果を確認した。図-6 より、1.0D ボルトは降下量 6mm 程度までは荷重低減効果がみられるが、その後、降下量がさらに増加すると効果は徐々に減少し、最終的には無対策と同程度の荷重になった。一方、1.5D ボルトは 1.0D ボルトに比べ荷重低減効果が大きく、その後、降下量が増加してもその効果は変わらず、最終降下量 20mm までほぼ同じ荷重低減効果を示した。さらに、ボルト長を 2.0D と長くした場合でもその荷重低減効果は 1.5D ボルトのケースと変わらない結果となっていることがわかる。この結果はロックボルトが効果的に働くための最適な長さが存在することを示している。

次に、このロックボルトの効果のメカニズムについて考えてみる。図-10 に、1.0D, 1.5D ボルトの落戸降下量と各層沈下量の関係をそれぞれ示す。1.0D ボルトの場合は、荷重低減効果が小さくなる降下量 6mm 付近までは地山が一体化しているが、その後、無対策 (図-8) と同様に共下がり領域 (高さ 12.5cm 程度) と地表面側領域に分離して行くのがわかる。一方、1.5D ボルトについては共下がり領域が形成される現象は最後までみられず地山が一体化し、地表面まで連続的に変形していることがわかる。さらに、無対策時より地表面沈下量 (H=30) が大きくなることも特徴的である。図-10 は、20mm 降下時の無対策, 1.5D ボルトの鉛直変位等高線図を比較したものであるが、これからもロックボルトがある場合は、共下がり領域が無対策時に比べ小さく抑えられていることがわかる。以上のように、ロックボルトを打設することで地山が一体化し、無対策時に比べ共下が

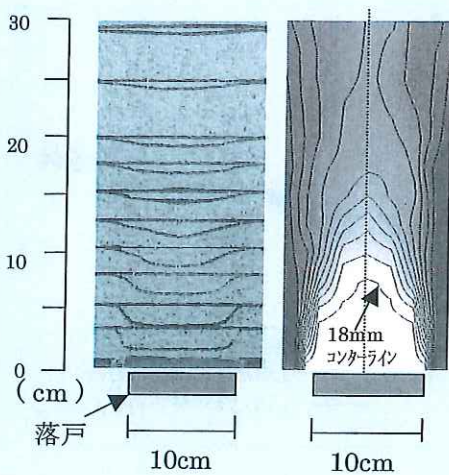


図-7 変形写真および鉛直変位等高線 (土被り 3D 無対策)

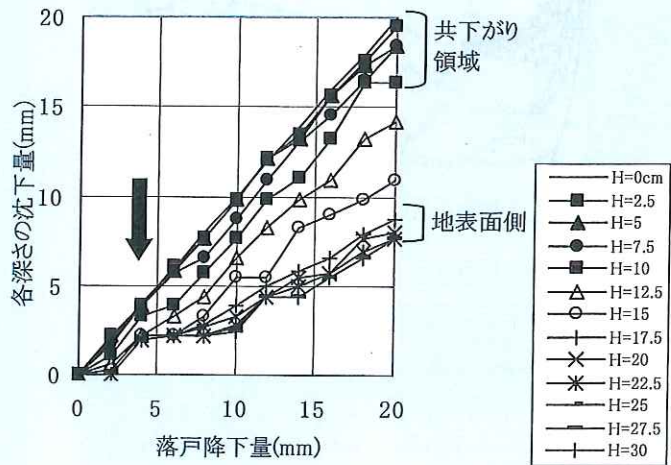


図-8 降下量-各深さの沈下量 (土被り 3D 無対策)

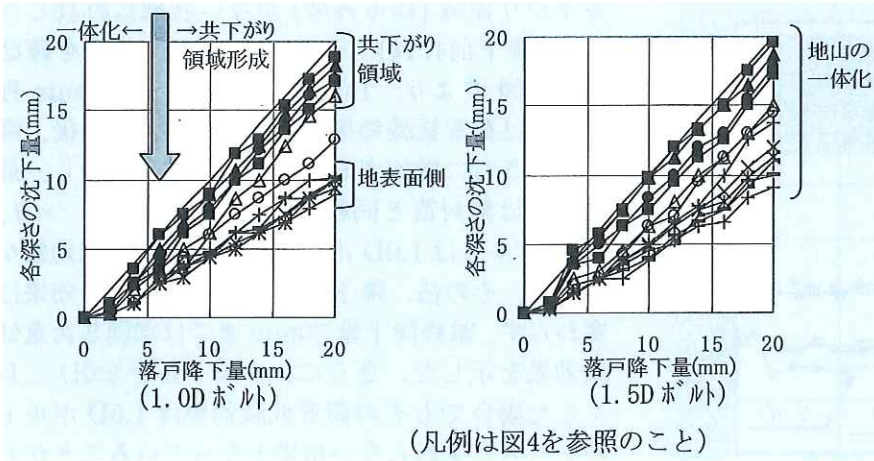


図-9 降下量-各深さの沈下量 (土被り 3D 降下前打設)

り領域が小さくなり、荷重低減効果が得られると考えられる。また、共下がり領域高さ程度の長さのロックボルト (1.0D) では、初期 (降下量の小さい) 段階では効果はあるものの、降下量が大きくなると効果はなくなることがわかった。

(3) 降下後打設のロックボルトの効果

無対策の状態では共下がり領域が形成される5mmまで降下させた段階でロックボルトを打設することで、ゆるみ領域に打設した場合 (降下後打設) のロックボルトの効果を確認した。図-11に落戸降下量と落戸荷重の関係を示す。共下がり領域内にとどまる程度の長さ1.0Dについて見てみる。既に発生している共下がり領域にロックボルトを打設することにより、一度形成されたアーチ効果が破壊され荷重が上昇するが (図中 a 部)、

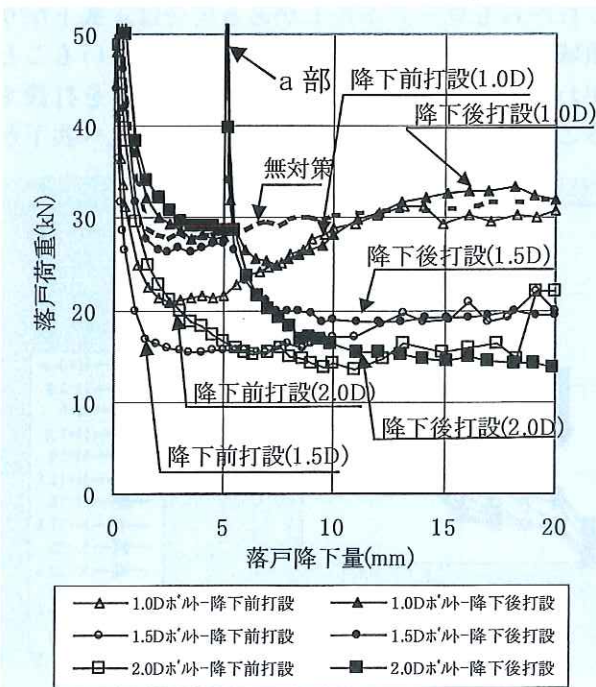


図-11 荷重降下量曲線 (土被り 3D 降下前・後打設)

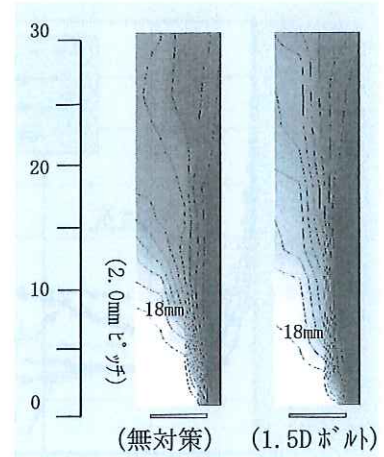


図-10 鉛直変位等高線図 (土被り 3D 降下前打設)

再度降下を開始すると急激に荷重が減少し、荷重低減効果が見られる。しかし、降下前打設の結果と比較すると降下後打設は荷重低減効果の絶対量は小さく、さらに降下量が増加すると降下前打設の曲線に重なり、最終的に荷重低減効果はなくなった。一方、共下がり領域よりも長い1.5D、2.0D ボルトでは、降下前打設時とほぼ同程度の荷重低減効果を示した。以上のことから、共下がり領域 (ゆるみ領域) が既に発生している場合は、共下がり領域程度の長さのロックボルトでも効果はあるものの、共下がり領域よりある程度長いロックボルトを打設することで、共下がり領域ができる前に打設したロックボルトと同程度の効果が期待できることがわかった。

3.2.2 土被り 1D の場合

図-12に落戸降下量と落戸荷重の関係を示す。無対策時の結果を見ると、降下量2mm程度まで落戸荷重は急激に減少し、土被り3Dの場合

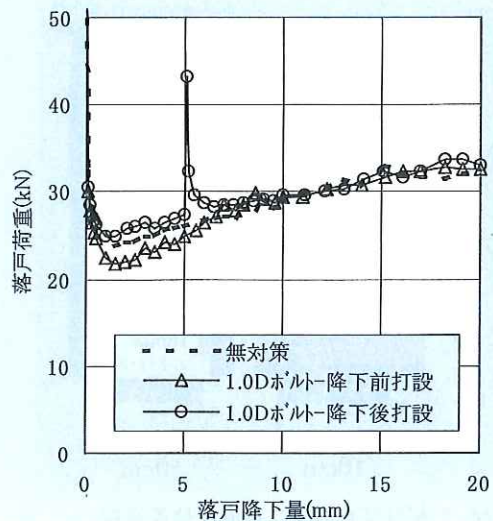


図-12 荷重降下量曲線 (土被り 1D 降下前・後打設)

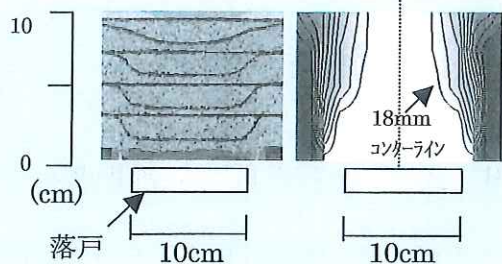


図-13 変形写真および鉛直変位等高線図 (土被り 1D 無対策)

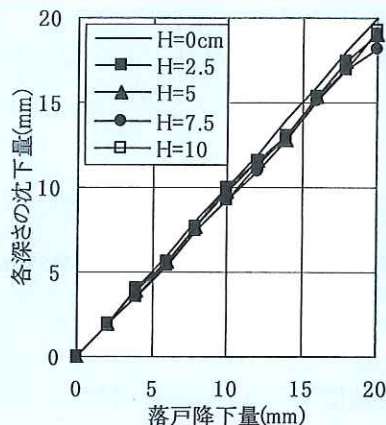


図-14 降下量-各深さの沈下量 (土被り 1D 無対策)

と比べ小さな最小荷重を示した。しかしながら、その後は一定値にならず、荷重が徐々に増加し、20mm 降下時の最終荷重はほぼ同程度の値となった。図-13、14 に土被り 3D 無対策時の図-7、8 に対応する結果を示す。土被り 3D に比べ、図-13 の鉛直変位等高線図より、より大きな共下がり領域が形成されていることがわかる。また、図-14 より地表面まで落戸 (H=0) と同様な変形挙動を示していることがわかる。

次に、ロックボルト (長さ 1.0D) の効果を見てみる。降下前打設の結果 (図-12) は、降下量 5mm 程度までは荷重低減効果がみられるが、最終的には無対策と同じ荷重に戻った。一方、降下後打設の結果 (図-12) は、土被り 3D の場合と同様に打設以降は降下前打設の曲線に重なるが、荷重低減効果はほとんど見られない結果となった。以上の

ことは、土被りが小さい場合のロックボルトの効果は、打設時期の影響が大きく、地山をゆるませてから打設した場合は効果がほとんど期待できないことを意味していると考えられる。

4. 結論

本研究では、ロックボルト支保効果に関して、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ゆるみ域とロックボルトの支保効果の関係について調べることを目的とした落戸実験を実施した。その結果、以下のことが明らかになった。

斜めボルトの支保効果に関する実験より

- ① 支保 (天端安定) 効果は、直ボルトが最も高いが、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支保効果が期待できる場合がある。
- ② 斜めボルトの支保効果は、斜めボルトの直角方向の投影長さと同じ長さのボルトをトンネル壁面直角方向に打設した場合とほぼ同等かやや高いと評価できる。

ゆるみ域と支保効果の関係に関する実験より

- ① 土被りが大きい場合は、ゆるみ域が発生している状態でも、ゆるみ域程度の長さのロックボルトを打設することにより、ゆるみ域が無い状態に打設した場合と比べて絶対値は小さいものの、支保効果は認められる。さらに、ゆるみ域を越えるような長さのロックボルトを打設すると、ゆるみ域が無い状態に打設した場合と同程度の支保効果が期待できる。
- ② 土被りが小さい場合は、ゆるみ域が発生している状態でロックボルトを打設しても支保効果はほとんど期待できない。

参考文献

- 1) 蒲田浩久、真下英人：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, 土木技術資料, Vol.44, No.5, P62-67, 2002.

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 トンネルチーム上席研究員,
工博
Dr.Hideto MASHIMO

森本 智***



同 トンネルチーム
Satoshi MORIMOTO