

砂質地山におけるロックボルトの作用効果 に関する実験的研究

Experimental research on effect of rock bolts installed in sandy ground

真下英人¹・森本智²・木谷 努³

Hideto MASHIMO, Satoshi MORIMOTO and Tsutomu KITANI

¹正会員 工博 独立行政法人土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

²正会員 独立行政法人土木研究所道路技術研究グループ (〒305-8516 つくば市南原 1-6)

³正会員 工修 パシフィックコンサルタンツ(株)トンネル部 (〒163-0730 東京都新宿区西新宿 2-7-1)

(元 独立行政法人土木研究所道路技術研究グループ 専門研究員)

Rock bolts have become a common measure for providing ground support. However, the effect of rock bolts in sandy ground is not verified theoretically and it is presumed that rock bolts in sandy ground exert the ability on the ground stability if its length and arrangements are designed appropriately and rock bolts are installed at the proper timing. In this paper, to clarify the mechanism of rock bolts effect in sandy ground, trapdoor model tests with various bolt length, inclination of rock bolts and time for installing rock bolts were carried out. It was found that in deep tunnel the longer bolts than loosened zone have the effect of integrating ground around a tunnel and rock bolts installed after the occurrence of loosened zone have the similar effect as the rock bolts installed before the occurrence of loosened zone.

Key Word: rock bolt, trap door test, tunnel support, loosened zone

1. はじめに

ロックボルトは、山岳トンネルにおける主たる支保部材の一つと考えられている。しかしながら、その作用効果は地質によって異なり、縫付け効果、はり形成効果、内圧効果、アーチ形成効果、地山改良効果といった概念が挙げられているものの、設計に利用できる段階まで解明されるに至っていないのが現状である。したがって、現在のロックボルトの設計は、過去に施工されたトンネルの実績から標準的な配置や長さ等を定めることが多いが、近年、建設が増えている土被りが浅い砂質地山においては天端部への打設の必要性を始めとして配置や長さの設定方法に定まったものがなく、合理的なロックボルトの設計方法の確立が望まれている。トンネル掘削では、切羽到達前から先行変位が発生しており、掘削直後にロックボルトを打設しても打設時には何らかの緩みが地山に生じているため、ロックボルトの作用効果と地山の緩みは密接に関係していると考えられる。したがって、ロックボルトの適切な長さや配置を設定するには、ロック

ボルトの長さおよび打設方向と緩み領域との関係や打設時の緩みの状態がロックボルトの効果に及ぼす影響を明らかにすることが非常に重要と考えられる。

ロックボルトの作用効果に関する既往の研究として、山本¹⁾は、ロックボルトのモデルを配置した落戸実験を実施し、ロックボルトの作用効果の解明を試みている。また、土門ら²⁾は、円形模擬地山中にロックボルトのモデルを配し載荷実験を実施することにより、ボルト長さ、軸方向打設ピッチ等をパラメータにロックボルトの支保効果について考察を行っている。土屋³⁾は、大型模型地山内にロックボルトを配する載荷実験を行い、トンネル補強効果と最適パターンについて研究を行っている。しかし、これまでのロックボルトの作用効果に関する既往の実験は、予めロックボルトを配し、その上で落戸変位や外圧を与えているものがほとんどであり、地山の緩みがある程度生じた状態でロックボルトを打設した場合の影響については考察したものは少ない。

本研究では、地山に発生する緩み領域とロックボルトの作用効果との関係を解明することにより、砂質地山に

おける合理的なロックボルトの設計法を確立することを目的とし、トンネル掘削による緩みの形成時期とロックボルトの打設時期、緩み領域に対する打設方向や長さとの関係に着目した落戸実験を行った。

2. 実験の概要

落戸実験は、トンネル掘削による地山の力学的挙動を解明するために古くから行われている(例えば4), 5)。この落戸実験は、模擬地盤の下部に設置された落戸模型を降下させることで、模擬地盤に緩みを発生させ、落戸に与えた変位と落戸に作用する荷重の関係や地山中に発生する変位等を測定するものである。本研究で用いた落戸実験装置の概要を図-1に示す。

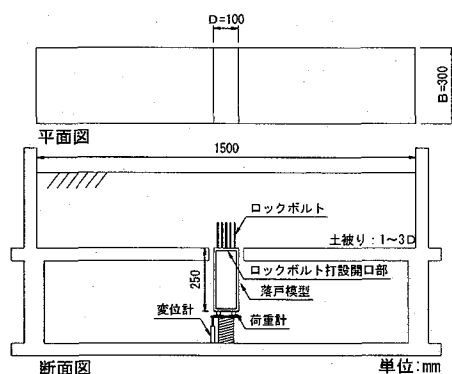


図-1 実験装置概要

本研究では、通常に用いられるような落戸実験装置に加え、ロックボルトの打設を随時行うことが出来る構造となっている(図-2 参照)。すなわち、矩形的落戸部(奥行き $B=300\text{mm}$ 、幅 $D=100\text{mm}$ 、高さ $T=250\text{mm}$)には、地山作成後にロックボルトが打設できるよう側部に開口部が設けてある。これにより、模擬地盤に緩みを発生させる前後において、ロックボルトを様々な角度で打設することができ、ロックボルトと地山の緩みの関係を検討できるようになっている。

実験は、模擬地盤を作成後、落戸を一定速度($0.25\text{mm}/\text{分}$)で連続的に降下させた。ロックボルトを打設する場合は、いったん落戸の降下を停止し落戸に設けた開口部から打設した。地山材料は乾燥状態にある珪砂4号($\gamma=15.7\text{kN}/\text{m}^3$)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模擬地盤を作成した。ロックボルトには定着力を確保するため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(32mm間隔)横断方向5列(20mm間隔)を基本に配置した。なお、実験は、①ロックボルトを打設せず無対策で落戸を降下するケース、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無対策状態で一旦ある程度落戸を降下させ地山に緩みを与え、降下床

を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)について実施した。さらに、それぞれのケースについて、土被り(3D, 2D, 1D, D: 落戸幅100mm以下同様)、ボルト長さ(1D, 1.5D, 2D)、ボルトの打設方向(直方向、斜め方向)を変化させた。

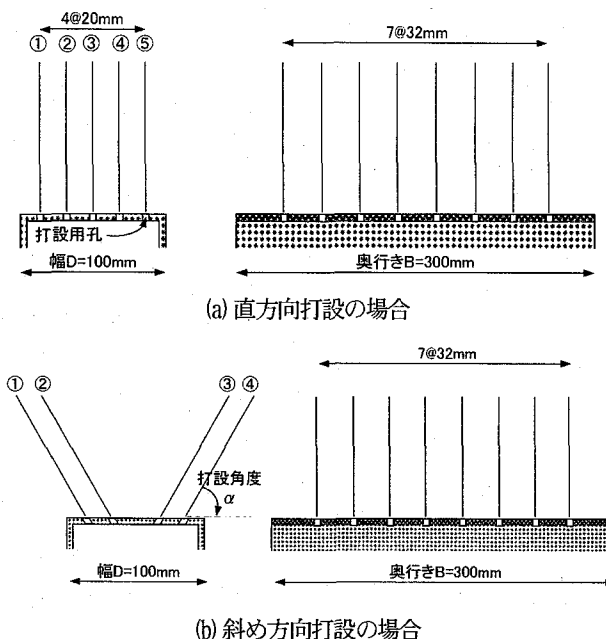


図-2 落戸に対するロックボルトの打設概要

3. 実験結果および考察

(1) ロックボルトが無い場合

ロックボルトを打設しない、無対策の場合の、落戸全体に作用する荷重(落戸荷重)と落戸に与えた降下量との関係を図-3に示す。

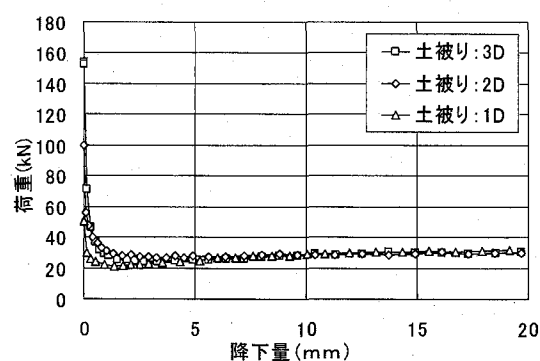
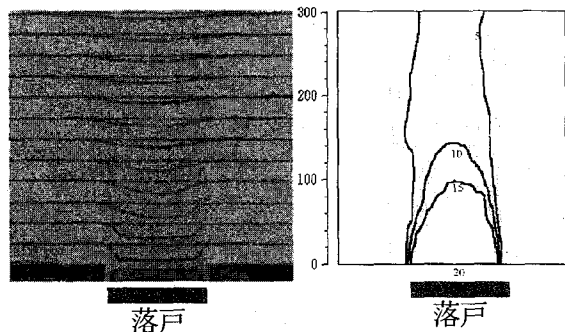


図-3 落戸荷重-落戸降下量関係
(ロックボルトを打設しない場合)

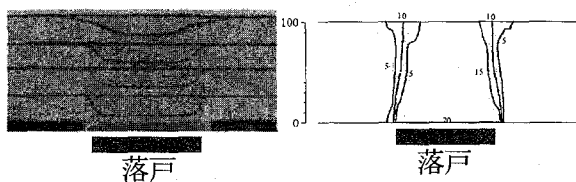
これによると、無対策での落戸荷重は、降下開始後すぐに減少を始め、降下量約3mm以降はほぼ一定値に収束していることが分かる。また、この収束値は、土被りが1D, 2D, 3Dでほとんど大差ないことが分かる。ただし、土被りが小さい1Dの場合には、落戸降下量が増大

するにつれて、落戸荷重が最小値に達した後、徐々に増加していく様子が認められる。これは、土被りが小さい場合は後述するように地山のアーチ効果が十分に発揮されないためと考えられる。

図4に、落戸降下前と20mm降下後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(1mm ピッチ、ただし 5mm ピッチで太線にて示す)を土被り 1D と 3D について示す。これによると、図4 (a) に示す土被りが 3D の場合には、最終形状として幅 10cm、高さ 10cm (1D) 程度の三角形の領域が確認できる。この領域は、落戸と一体となって降下する、共下がり領域と言える。一方、図4 (b) に示す土被りが 1D の場合には、このような明確な三角形の領域は確認できず、地表面近くまで共下がり領域が到達しており、落戸から地表面までの矩形領域がほぼ剛体的に降下していることが分かる。なお、緩み領域の定義は必ずしも明確にはされていないが、砂質地山では、この共下がり領域が緩み領域に相当するものと考えられる。



(a) 土被り 3D の場合

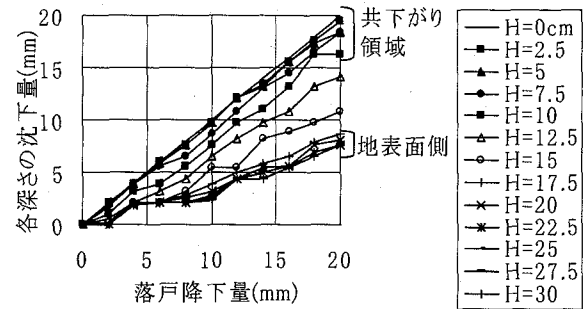


(b) 土被り 1D の場合

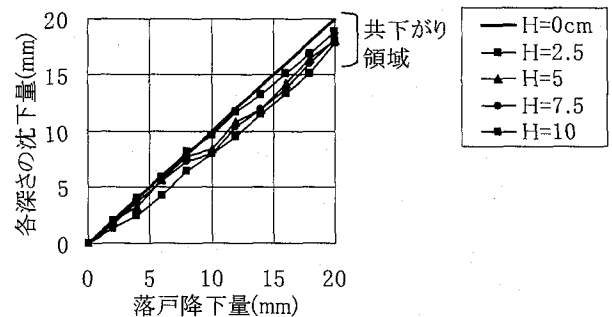
図4 落戸降下前後の重ね写真と等変位コンター図

さらに、この共下がり領域の形成過程を土被り 3D と 1D の場合について詳しく考察することとする。図-5は、落戸からの高さ (H=0cm は落戸上面、H=30cm は地表面) ごとに、各深さでの落戸中心ラインにおける沈下量と落戸の降下量の関係を示したものである。なお、この図で直線の傾きが 45°に近いほど、地山が落戸と一体となって共下がりをしていることを意味している。土被りが 3D の場合は、地山は荷重が一定値となる降下量 4mm 付近から、落戸と一体となって共下がりしようとする領域(落戸からの高さ 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(落戸からの高さ H=17.5~30cm) に分かれていくことが分かる。すなわち、図4(a)

で認められた三角形の共下がり領域は、この分離過程により形成されていることが分かる。一方、土被りが 1D の場合は落戸と一体となって共下がりしようとする領域が地表面近くまで及び、自立する領域が明確には形成されていない。



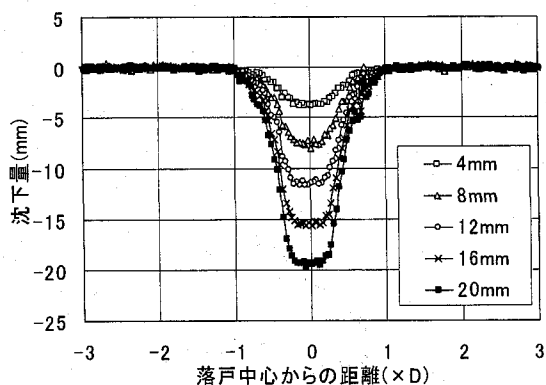
(a) 土被り 3D の場合



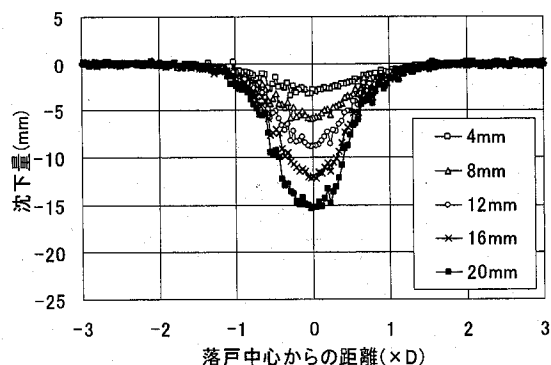
(b) 土被り 1D の場合

図-5 各深さの沈下量と落戸降下量の関係

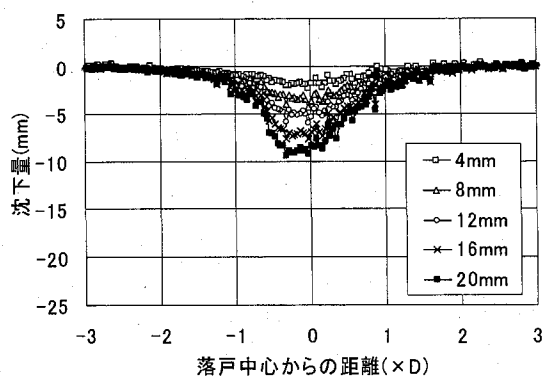
図-6は、落戸降下量(ここでは、4mm ピッチとした)ごとの地表面沈下を各土被りについて示したものである。同じ落戸降下量であっても土被りが浅くなると地表面沈下が大きくなり、特に土被りが 1D の場合は落戸の降下量とほぼ同程度の地表面沈下が発生し、前述したように共下がり領域が地表面近くまで及んでいるのが分かる。また、土被りが浅くなると地表面沈下形状が局所的となっていることが分かる。



(a) 土被り 1D の場合



(b) 土被り 2D の場合



(c) 土被り 3D の場合

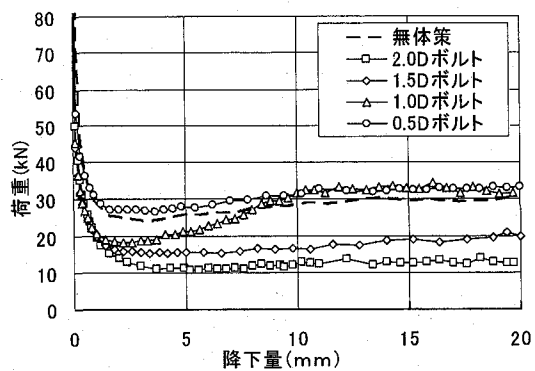
図-6 落戸降下量ごとの地表面沈下量

(2) 共下がり領域形成前に打設されたロックボルトの効果

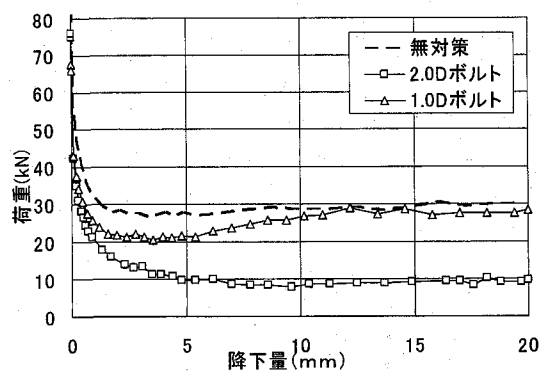
落戸降下前にロックボルトを打設する場合について、土被りやロックボルトの長さ、打設角度とロックボルトの効果を検討する。この場合は、落戸降下前にロックボルトを打設するので、共下がり領域が形成される前にロックボルトが打設されていることとなる。

a) 直方向打設の場合

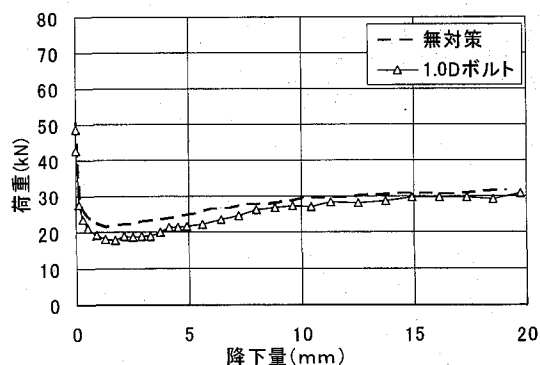
図-7 に落戸荷重と落戸降下量関係を示す。



(a) 土被り 3D の場合



(b) 土被り 2D の場合



(c) 土被り 1D の場合

図-7 落戸荷重-落戸降下量関係

図-7(a)より、土被り 3D については、ロックボルト長さ 0.5D の場合は、ロックボルトの効果は全く認められず、ロックボルト長さが 1D の場合は、落戸降下量が約 6mm 程度までは落戸荷重に対する低減効果がみられるが、その後、落戸降下量が増加するにつれて、ロックボルトの効果は徐々に減少し、最終的には無対策と同程度の落戸荷重に収束していった。一方、ロックボルト長さが 1.5D の場合は、長さが 1D の場合に比べ、落戸荷重の低減効果が大きく、最終落戸降下量 20mm までロックボルトの荷重低減効果は、降下量が小さい時とほぼ同等に発揮された。さらに、ロックボルト長さが 2D の場合もその荷重低減効果は、ロックボルト長さが 1.5D の場合よりもさらに大きくなっていることが分かる。この結果は、ロ

クボルトが効果的に働くために必要な長さがあり、その長さは地山に生じる変位と関係していることを示している。

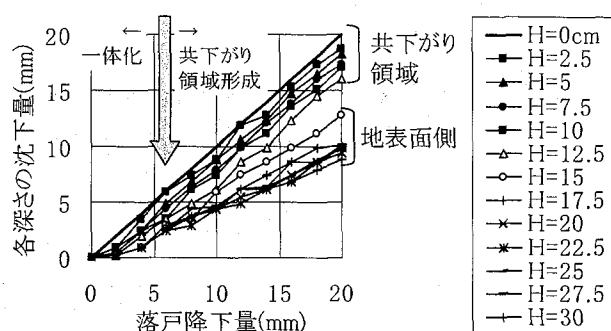
同様に、図-7(b)の土被り 2D については、ロックボルト長さが 1D の場合には、降下量が增大するにつれて落戸荷重が無対策のものに収束していき、ロックボルトの荷重低減効果が降下量の増大とともに失われるのに対して、ロックボルト長さが 2D の場合には、最終落戸降下量 20mm までロックボルトの荷重低減効果が持続していることが分かる。一方、図-7(c)の土被り 1D については、ロックボルト長さが 1D であっても初期のわずかな降下量の段階では荷重低減効果が認められるものの低減量は非常に小さく、また、非常に小さい降下量の段階で落戸荷重は無対策のものに収束している。

次に、落戸降下前に打設されたロックボルトの作用効果のメカニズムについて、土被り 3D の場合を例として考察してみる。図-8 は、落戸からの高さ ($H=0\text{cm}$ は落戸上面, $H=30\text{cm}$ は地表面) ごとについて、各深さでの落戸中心ラインにおける沈下量と落戸の降下量の関係を示したものである。なお、図-8 の(a)はロックボルト長さが 1D のもの、同じく(b)が 1.5D のもの、(c)が 2D のものである。

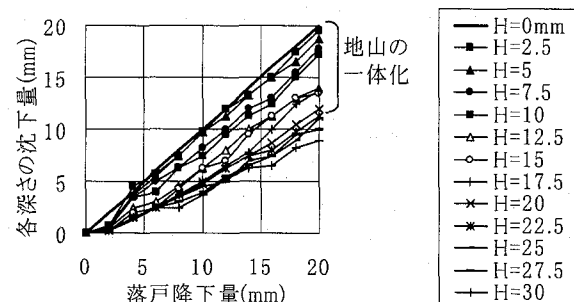
図-8 によれば、ロックボルト長さが 1D の場合は、荷重低減効果が小さくなる降下量 6mm 付近までは地山が一体化しているが、それ以降、ロックボルトを打設しない場合 (図-5(a)) と同様に落戸と一体となって降下する共下がり領域 (高さ 12.5cm 程度) と地表面側領域に分離して行くのがわかる。一方、ロックボルト長さが 1.5D および 2D の場合については、共下がり領域が形成される現象は最後までみられず、地山が全体にわたって一体化し、地表面まで連続的に変形していることが分かる。

図-9 は、ロックボルトの長さが 1D で土被り 1D の場合について図-8 と同様に示したものである。これによると、土被り 3D の場合と異なり、地山全体にわたり共下がり領域となっていることが分かる、また、これは、同じ土被りでロックボルトがない場合の図-5 (b) とほぼ同様であると言える。

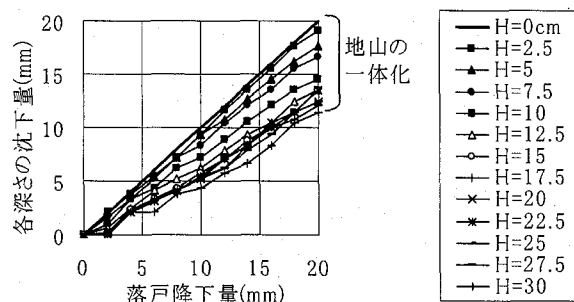
図-10 は、土被り 3D の場合について、落戸降下量 (ここでは、4mm ピッチとした) ごとの地表面沈下をロックボルト長さごとに示したものであるが、同じ落戸降下量であってもロックボルトが長くなるにつれて地山の一体化により地表面沈下がわずかであるが大きくなっていることが分かる。



(a) ロックボルト長さ 1D の場合

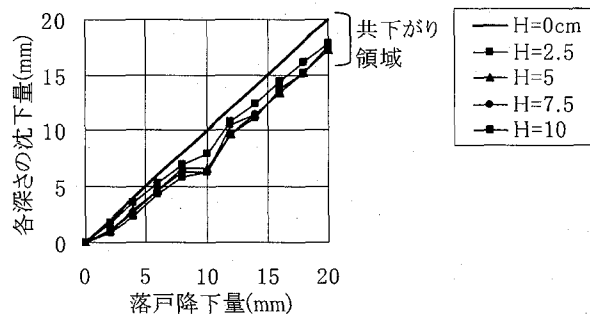


(b) ロックボルト長さ 1.5D の場合



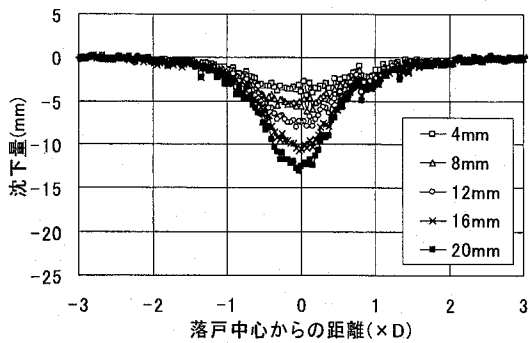
(c) ロックボルト長さ 2D の場合

図-8 各深さの沈下量と落戸降下量の関係 (土被り 3D)

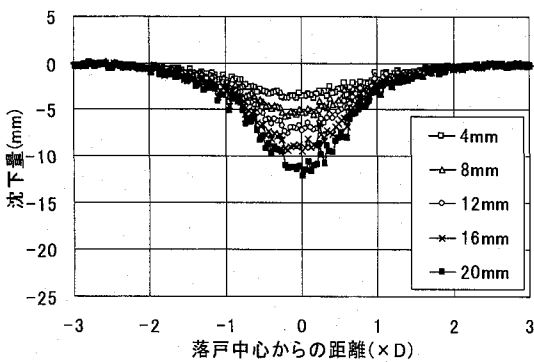


ロックボルト長さ 1D の場合

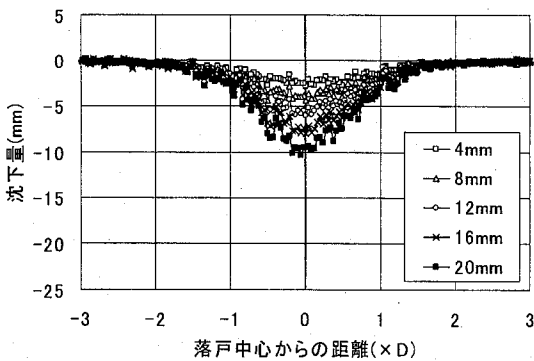
図-9 各深さの沈下量と落戸降下量の関係 (土被り 1D)



(a) ロックボルト長さ 2D の場合



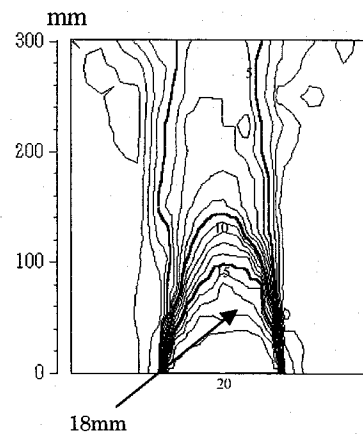
(b) ロックボルト長さ 1.5D の場合



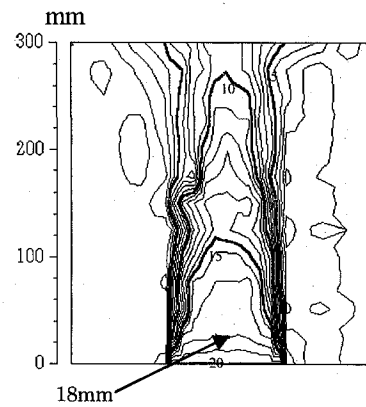
(c) ロックボルト長さ 1D の場合

図-10 ロックボルト打設時の落戸降下量ごとの地表面沈下量
(土被り 3D の場合)

図-11 は、土被り 3D の場合について、ロックボルトを打設しない場合と長さ 1.5D のロックボルトを打設した場合の両者について、落戸降下量が 20mm の時の鉛直変位等高線図を比較したものである。また、図-12 は、同様に土被り 1D の時について、ロックボルトを打設しない場合と落戸降下前に長さ 1D のロックボルトを打設した場合について、落戸降下量が 20mm の時の鉛直変位等高線図を比較したものである。

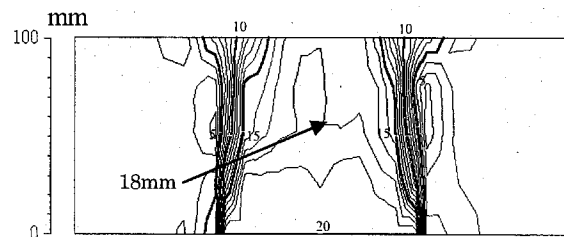


(a) ロックボルトを打設しない場合

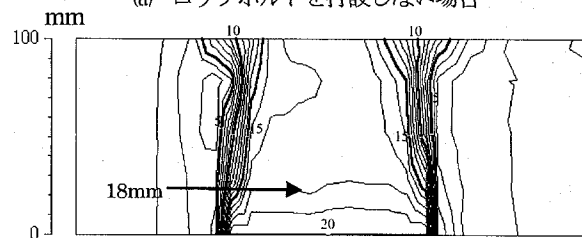


(b) 長さ 1.5D のロックボルトを打設した場合

図-11 ロックボルトの有無と等変位コンター図
(土被り 3D の場合)



(a) ロックボルトを打設しない場合



(b) 長さ 1D のボルトを打設した場合

図-12 ロックボルトの有無と等変位コンター図
(土被り 1D の場合)

これによると土被りが 3D の場合、ロックボルトを打設した場合には、例えば、落戸降下量 20mm とほぼ同じ 18mm 降下する領域を見れば、落戸と一体的に降下する共下がり領域がロックボルトを打設しない無対策の場合

に比べ、小さく抑えられていることが分かる。また、変位が落戸降下量の半分の10mmの領域は、ロックボルトを打設しない場合はトンネル直上1.5D程度の範囲にあるのに対し、ロックボルトを打設した場合は、その領域が大きく、地表面近くまで広がっている。このことからロックボルトを打設しない場合は地山が共下がり領域とそれ以外の領域に分かれる傾向にあるが、ロックボルトを打設すれば、地山が一体化することが分かる。一方、土被り1Dの場合は、共下がり領域がロックボルト打設によって小さくなっている傾向はあるもの、地山の一体化の現象はさほど顕著ではないことが分かる。

図-13、14は、土被りが3Dでロックボルトの効果が現れたロックボルトの長さ2Dの場合(図-14)と落戸の降下に伴って効果が失われた長さ1Dの場合(図-13)について、ロックボルトに発生する軸力分布を示したものである。ロックボルトが効果を発揮し、地山の一体化が図られている長さ2Dの場合は中央部の3本のロックボルトには引張力が発生しているのに対して、ロックボルトの効果が現れていない長さが1Dの場合は一部のロックボルトを除いて圧縮力が発生しているのが認められる。

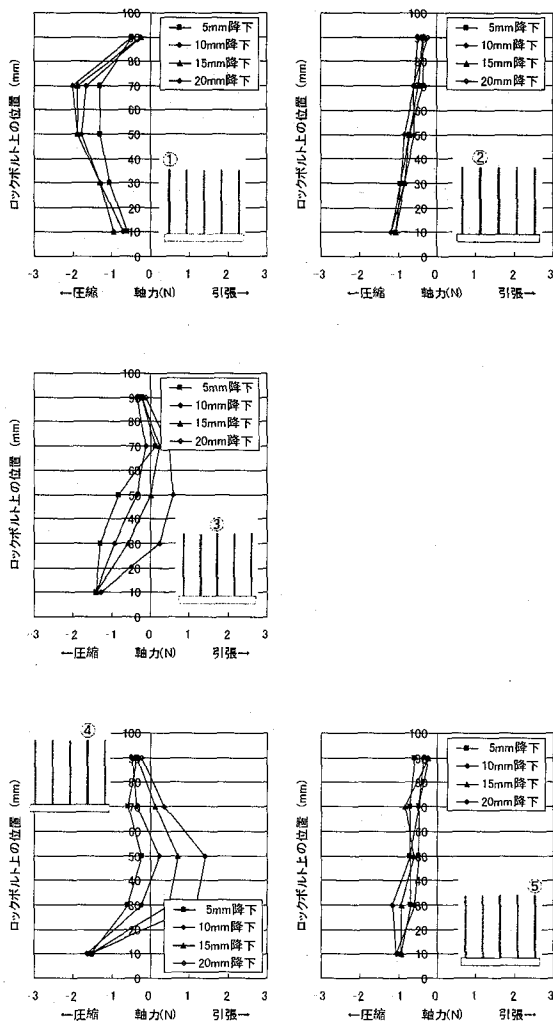


図-13 ロックボルトの軸力分布(土被り3D, 長さ1D)

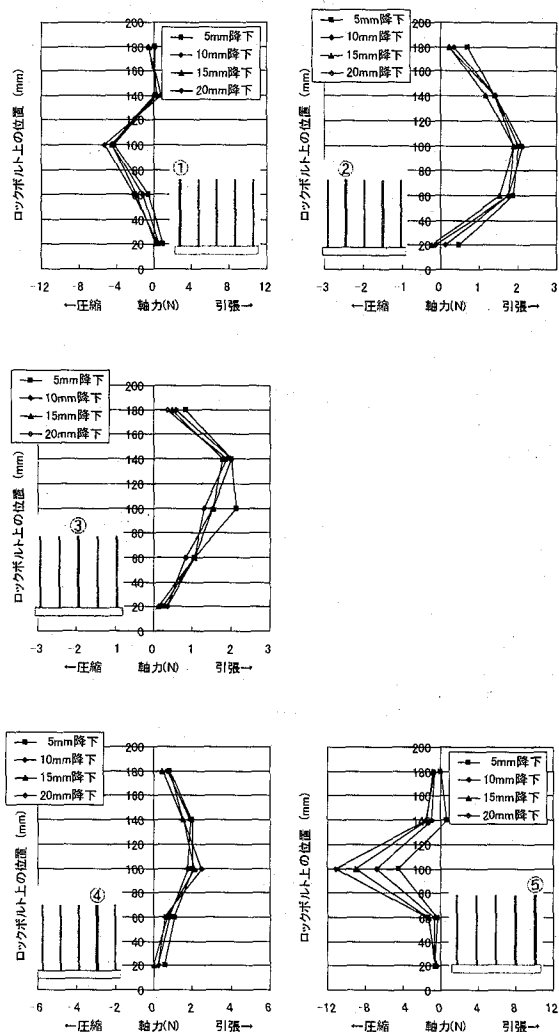


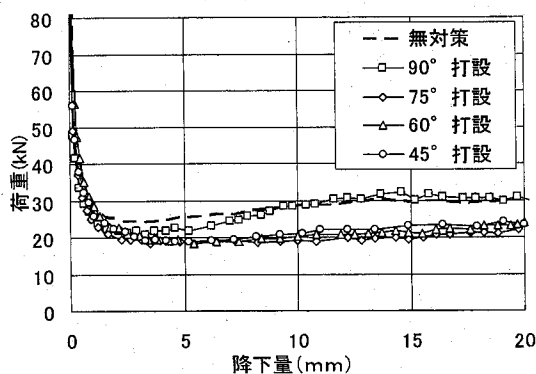
図-14 ロックボルトの軸力分布(土被り3D, 長さ2D)

以上のように、ロックボルトの作用効果は、ロックボルトを打設することで地山全体が一体化し、ロックボルトを打設しない無対策の場合に比べて落戸とともに降下する共下がり領域が小さくなり、落戸作用荷重の低減効果として現れることが分かる。また、その際、ロックボルトには引張力が発生する。さらに、ロックボルトの長さが共下がり領域高さ程度(本研究では1D)の場合は、落戸降下量が小さく共下がり領域がさほど発達していない初期段階においてはロックボルトの効果が期待できるものの、降下量が大きくなり共下がり領域が発達するとその効果が失われるのに対して、ロックボルト長さがそれ以上の場合は降下量が増加しても効果は持続することが分かる。

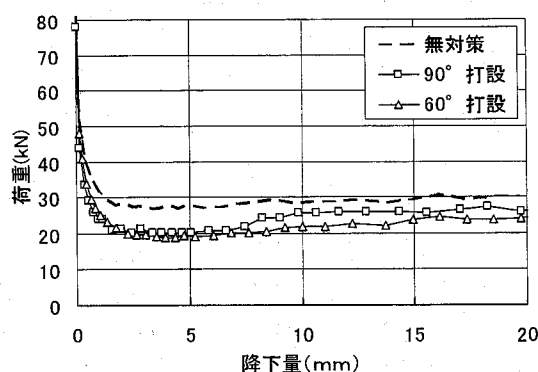
b) 斜め方向打設の場合

ここでは、斜め方向に打設されたロックボルトの効果について考察する。図-15は、ロックボルトの打設角度を変化させた場合の落戸荷重と落戸降下量の関係である。90°打設は、図-2で示したように落戸に対して直角に打設

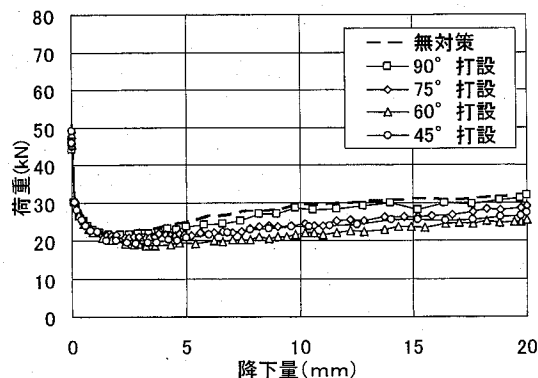
するケースであるが、 90° 以外の角度のケースとロックボルト本数を合わせるため、落戸中央のロックボルトを除外し、新たな実験ケースとして実施している。ロックボルトの長さは1Dとし、打設角度は土被り3Dと1Dに対しては、 90° 、 75° 、 60° 、 45° の4ケースとした。また、土被り2Dに対しては、ロックボルトを直角に打設した場合は土被り3Dと同様の効果が現れたことから、斜め方向に打設した場合の効果は実験を簡素化しても土被り3Dの結果から類推できるものと考え、 90° と 60° の2ケースとした。また、図-15では、それぞれの土被りでロックボルトを打設しない無対策の場合の落戸荷重と落戸降下量関係も同時に示した。



(a) 土被り3Dの場合



(b) 土被り2Dの場合



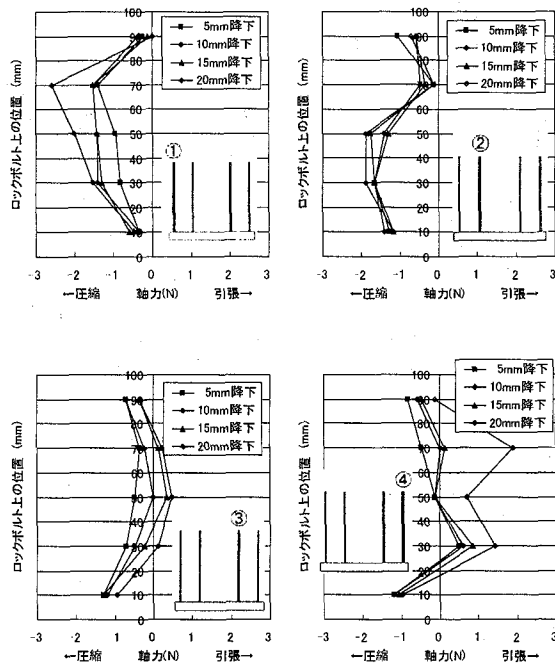
(c) 土被り1Dの場合

図-15 ロックボルト打設角度の違い (ロックボルト長さ1D)

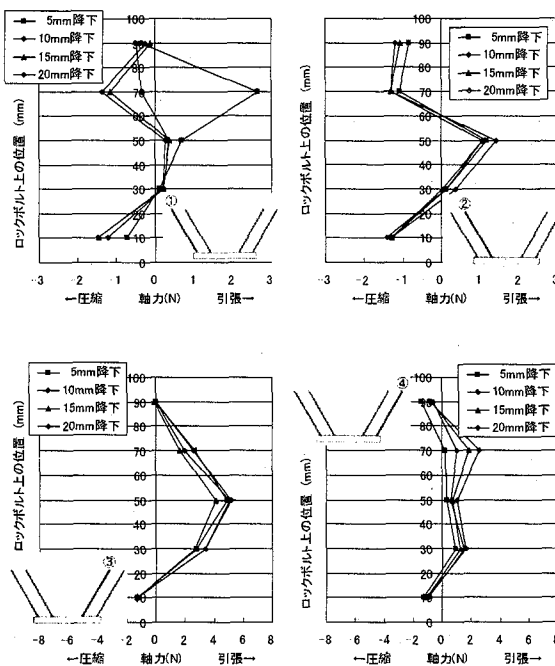
図-15によると、土被りが2D、3Dの場合、ロックボルトが落戸に対して直角である 90° 打設の場合の落戸荷重は、前述したように落戸降下量が増加するにしたがって無対策の場合のものに近くなる。一方、角度を小さくした 45° 、 60° および 75° での打設の場合は、各々の土被りでの 90° 打設の場合に比べて、降下量が増加してもロックボルトの荷重低減効果が認められる。また、土被りが1Dの場合は、 90° 打設の場合はロックボルトの効果が現れるのは落戸の降下量がごく初期の段階だけですぐに無体策の場合に収束していたが、 45° 、 60° および 75° での打設の場合は降下量が増加しても引き続き荷重低減効果が認められる。

図-16は、土被りが3Dで打設方向が 90° と 60° の場合について、ロックボルトに発生する軸力分布を示したものである。ロックボルトの効果が現れない 90° の場合は、大半のロックボルトには圧縮力が発生しているのに対して、ロックボルトの効果が現れた 60° の場合は引張力が発生していることが分かる。

以上のように、直方向に打設した場合には明確な効果が現れなかった長さのロックボルトでも斜め方向に打設した場合には効果が現れる場合があることが分かるが、その理由としては以下のことが考えられる。すなわち、ロックボルトの作用効果は、ロックボルトを打設することで地山全体が一体化させることであると考えられることはすでに述べた。一方、その一体化には、ロックボルトが共下がり領域とそれ以外の領域を結びつける、言い換えれば、ロックボルトが共下がり領域外側に十分定着される必要がある。このことから、斜め方向打設が直方向打設よりロックボルトの荷重低減効果が顕著である理由は、図-17のように共下がり領域より外側にロックボルトが定着され、地山が一体化しやすいためであると考えられる。



(a) 直方向打設の場合 (90°)



(b) 斜め方向打設の場合 (60°)

図-16 打設方向の違いによるロックボルトの軸力分布 (土被り3D, ロックボルト長さ1D)

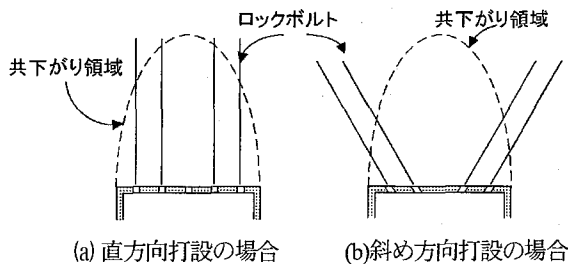


図-17 ロックボルトによる地山の一体化と打設角度

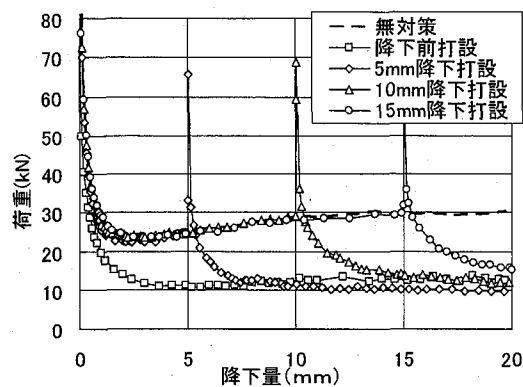
(3) 共下がり領域形成後に打設されたロックボルトの効果

落戸を降下させて共下がり領域を形成させた後、ロックボルトを打設し、さらに落戸を降下させる場合の実験結果について述べる。図-18は土被り3Dの場合について、落戸降下後にロックボルトを直方向に打設した場合の落戸荷重と落戸降下量の関係を示したものである。なお、同図には、ロックボルトを打設しない無対策の場合と落戸降下前にロックボルトを打設した場合もともに示した。

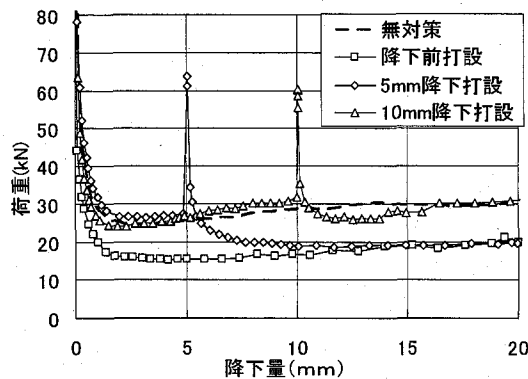
図-18(a)に示すロックボルト長さ2Dの場合は、ロックボルトを打設することにより、落戸降下に伴って発揮されたアーチ効果が破壊され落戸荷重が一旦上昇しているが、再度落戸降下を開始すると落戸荷重が急激に減少し、荷重低減効果が現れた。この荷重低減効果は、どの降下量でロックボルトを打設しても、落戸打設前に打設したものと大差なく、両者の最終的な落戸荷重はほぼ一致している。これは、ロックボルトの長さが落戸降下により形成される共下がり領域より十分長いと推測される。

一方、図-18(b)に示すロックボルト長さ1.5Dの場合については、ロックボルト打設時の落戸降下量によってロックボルトの荷重低減効果が大きく異なっている。すなわち、落戸降下量が5mmの時にロックボルトを打設した場合、打設後の落戸荷重は、落戸降下前にロックボルトを打設した場合の落戸荷重に収束している。一方、落戸降下量が10mmの時にロックボルトを打設した場合、打設後の落戸荷重は、ロックボルトを打設しない無対策の場合の落戸荷重に収束している。したがって、ロックボルト長さ1.5Dの場合は、共下がり領域が大きく発達した段階で打設した場合には効果は期待できないと言える。

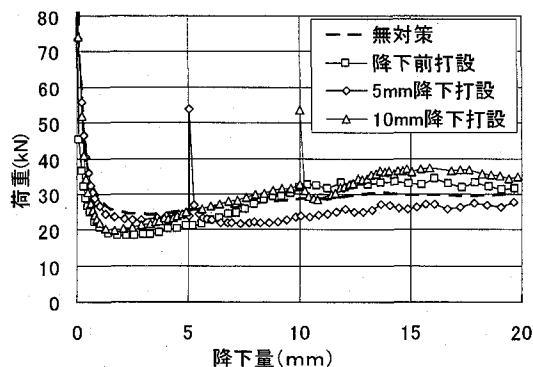
さらに、図-18(c)に示すロックボルト長さ1Dの場合の落戸荷重は、落戸降下量が5mm、10mmの時にロックボルトを打設した場合のものは、落戸降下前にロックボルトを打設した場合のものに概ね収束しており、ロックボルトの効果はほとんど認められない。また、図-18(d)に示すロックボルト長さ0.5Dの場合は、打設時期に関わらずロックボルト打設の効果はほとんど認められない。



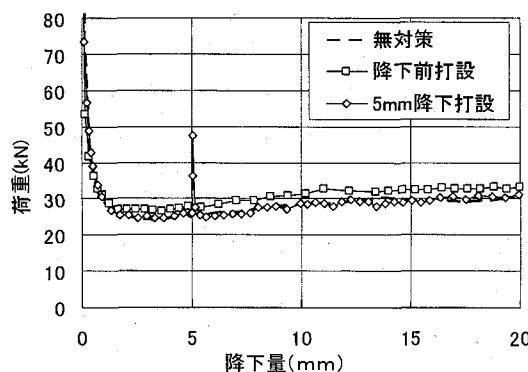
(a) ロックボルト長さ 2D の場合



(b) ロックボルト長さ 1.5D の場合



(c) ロックボルト長さ 1D の場合



(d) ロックボルト長さ 0.5D の場合

図-18 落戸荷重-落戸降下量関係 (土被り 3D, 直方向打設)

図-19 は、落戸を 5mm 降下させることにより共下がり領域を形成させた後に直方向に打設されたロックボルトに発生する軸力分布を土被りが 3D, ロックボルト長さが 2D の場合について示したものである。共下がり領域形成後に打設されたロックボルトも共下がり領域形成前に打設されたロックボルトと同様に、中央部の 3本のロックボルトには引張力が発生しているのが認められる。

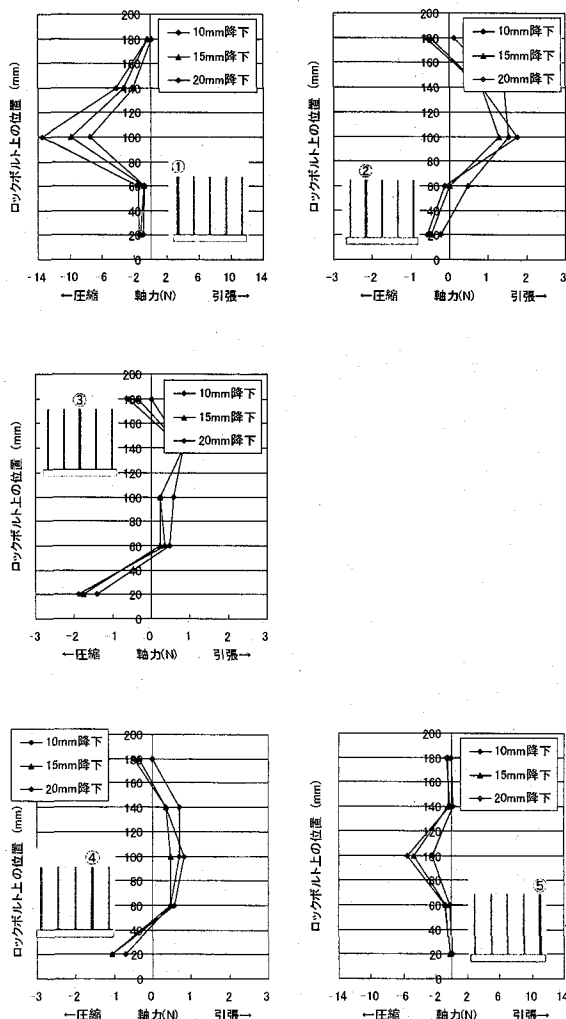
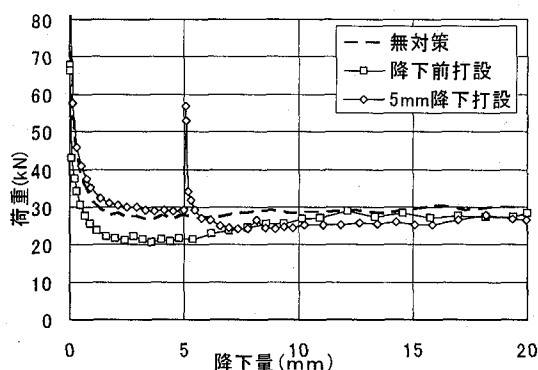


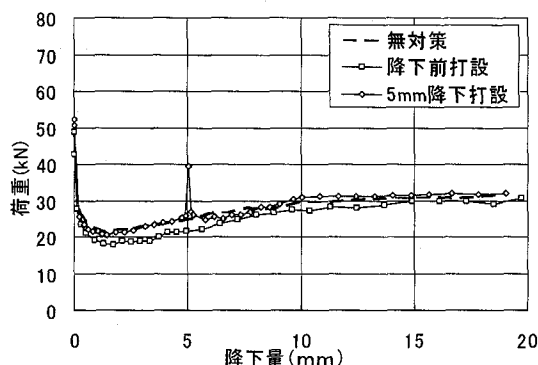
図-19 ロックボルトに発生する軸力分布
(土被り 3D, ロックボルト長さ 2D, 直方向打設)

図-20, 21 は、土被り 2D および 1D の場合について、5mm の落戸降下後に長さ 1D のロックボルトを直方向に打設した場合の落戸荷重と落戸降下量との関係を示したものである。両ケースともロックボルト打設後の落戸荷重は土被り 3D の場合と同様に落戸降下前に打設した場合の落戸荷重に収束していることが分かる。



ロックボルト長さ 1D の場合

図-20 落戸荷重-落戸降下量関係 (土被り 2D, 直方向打設)

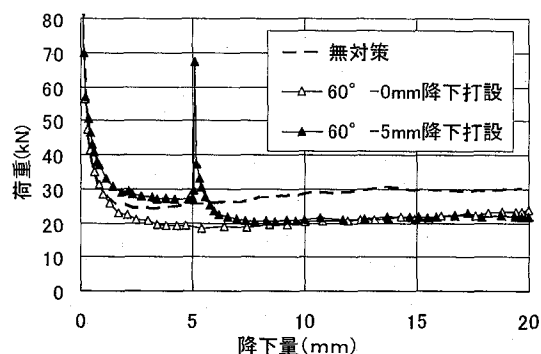


ロックボルト長さ 1D の場合

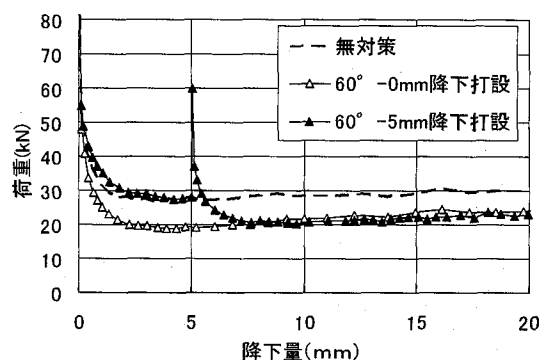
図-21 落戸荷重-落戸降下量関係 (土被り 1D, 直方向打設)

図-22 は、土被り 3D, 2D, 1D の場合について 5mm の落戸降下後に長さ 1D のロックボルトを斜め方向 (60°) に打設した場合の落戸荷重と落戸降下量との関係を示したものである。各ケースとも斜め方向に打設した場合も、落戸降下後に打設されたロックボルトは落戸降下前に打設されたロックボルトと同様の効果が現れていることが分かる。

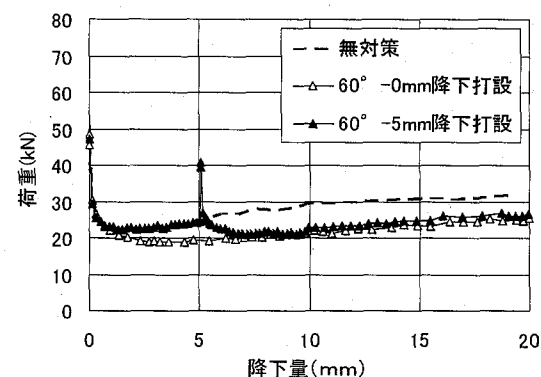
以上のように、共下がり領域が形成された後、ロックボルトを打設した場合は、打設時には一時的に落戸荷重が増加するが、その後の落戸降下に伴うロックボルトの効果は共下がり領域が形成される前に打設されたロックボルトとほぼ同程度の荷重低減効果となることが分かる。言い換えれば、ロックボルトが共下がり領域に比べて十分長い場合、共下がり領域が発達した段階であってもロックボルトを打設すれば、効果が期待できるが、土被りが浅い場合やロックボルト長が十分でない場合は、共下がり領域が発達してからロックボルトを打設しても効果はほとんど期待できないと言える。



(a) 土被り 3D の場合



(b) 土被り 2D の場合



(c) 土被り 1D の場合

図-22 落戸荷重-落戸降下量関係
(ロックボルト長さ 1D, 斜め方向打設)

4. 結論

本研究では、砂質地山を対象にしてトンネル掘削による緩みの形成時期とロックボルトの打設時期、緩み領域に対するロックボルトの打設方向や長さとの関係に着目した落戸実験を行った。

それにより得られた知見は以下の通りである。

- ①土被りが深い場合は、落戸の降下に伴って地山は落戸と一体となって共下がりしようとする領域 (緩み領域) とアーチ効果により自立しようとする地表面側の領域に分かれる。一方、土被りが浅い場合は落戸と一

体となって共下がりしようとする領域が地表面近くまで及び、自立する領域が明確には形成されない。

- ②砂質地山におけるロックボルトの作用効果は、ロックボルトを打設することで地山全体が一体化し、ロックボルトを打設しない場合に比べて共下がり領域が小さくなり、落戸作用荷重の低減効果として現れる。その際、ロックボルトには引張力が発生する。
- ③地山を一体化させるには、ロックボルトが共下がり領域外側の自立した領域に十分定着される必要があり、土被りが浅い場合は地表面近くまで共下がり領域が及ぶため、ロックボルトの効果はほとんど期待できない。また、直方向に打設した場合には効果が期待できないロックボルト長であっても、ロックボルトを斜め方向に打設した場合は、共下がり領域の外側に十分な定着がとれることになり、ロックボルトの効果が現れる場合がある。
- ④ロックボルトの長さが共下がり領域高さ程度の場合、落戸降下量が小さくて共下がり領域がさほど発達していない初期段階においては、ロックボルトの効果が期待できるものの、降下量が増加して共下がり領域が発達するとその効果が失われる。一方、ロックボルト長さがそれ以上の場合、落戸降下量が増加してもロックボルトの効果は持続する。
- ⑤共下がり領域が形成された後打設されたロックボルトの効果は、共下がり領域が形成される前に打設されたロックボルトとほぼ同程度の効果となる。言い換えれば、土被りが浅い場合やロックボルト長が十分でない場合は、共下がり領域が発達してからロックボルトを打設した場合の効果はほとんど期待できない。

なお、本研究は、極めて簡単なモデル実験を実施したものであり、実際のロックボルトの力学特性の一側面を捉えているに過ぎない。例えば、本実験では実際のトンネルとの相似則を考慮していないため、落戸荷重やロックボルトの緒元に対する定量的評価を行うには別の角度から更なる検討が必要である。しかし、砂質地山におけるロックボルトの効果に対しては、打設時期の緩みの影響や打設角度が極めて重要な要素であり、本研究で得られた知見が今後の参考となると考えられる。

参考文献

- 1) 山本稔：ロックボルトの作用効果について，土木学会論文集，No.277，pp.95-104，1978.9
- 2) 土門剛，今田徹，西村和夫：連続体地山のロックボルト作用効果に関する模型実験，トンネル工学研究論文・報告集，Vol. 8，pp.193-198，1988.11
- 3) 土屋敬：ロックボルトのトンネル補強効果と最適設計パターンに関する実験的研究，土木学会論文集，No.436/Ⅲ-16，pp.17-26，1991.9
- 4) 小野諒兄，眞井耕象：乾燥砂層に於ける垂直土圧，土木学会誌，vol.187，No.3，pp.437-459，1938.5
- 5) 村山朔郎：砂層内部沈下部にかかる垂直土圧，京大防災研究所年報第 11 号 B，pp.549-565，1968.3