

打設時期の違いによるロックボルト効果に関する基礎的研究

The influence of time for installing rock bolts on the effect

森本智¹⁾・真下英人²⁾・蒲田浩久³⁾

Satoshi MORIMOTO, Hideto MASHIMO and Hirohisa KAMATA

A delay in installing rock bolts means generating loosen area around tunnels. There are, however, still uncertainties about the effect of rock bolts in loosen area. An example is whether we should install the longer bolts than the loosen area or not. In this paper, to obtain the influence of time for installing rock bolts on the effect, trapdoor tests with various bolt length and time for installing bolts and numerical analyses using 2D-FDM were carried out. It was found that in deep tunnel the longer bolts than the loosen area have almost the same effect irrespective of the time. On the other hand, in shallow tunnel, the time has an influence on the bolts effect.

Key Words : rock bolt, trapdoor test, loosen area, numerical analysis

1. はじめに

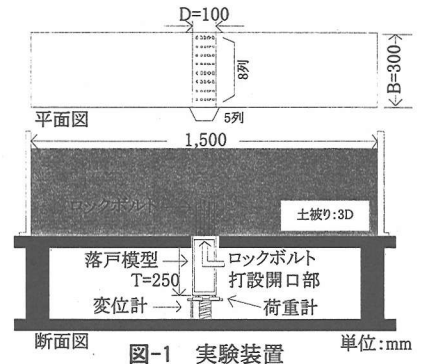
ロックボルトは、新設トンネルの支保部材や既設トンネル掘削時における天端の補強材として使用されている。その効果のメカニズム解明に関しては、これまで岩盤を対象としては多く実施され、縫い付け効果、内圧効果、アーチ効果、地山改良効果などいくつか提案されている。しかしながら、土被りが薄く十分な地山強度が得られない未固結（土砂）地山や土被りが大きくても破砕帯などの軟弱層での効果については不明な点が多く、より合理的な設計法の確立が望まれている。

これまで著者らは遠心載荷試験を用いてこれらの効果について検討してきており、天端部のロックボルトの支保効果や斜めボルトの支保効果などを明らかにしてきた¹⁾。しかしながら、これらは、その実験の方法からトンネル掘削前からボルトを地山に打設する必要があるため、厳密には、地山にゆるみ域が発生していない状態で打設した事前打設（先行打設）ボルトの効果を調べていることになる。また、落戸模型実験を用いたロックボルトの効果に関する研究^{2),3)}も行われており、その効果は確認されているが、いずれの実験も最初にゆるみ域のない状態での実験である。しかし、新設トンネルのロックボルトは、掘削後の応力解放がある程度進んだ段階で打設される場合が多く、打設時期が遅れることによってゆるみ域が形成されている場合がある。また、既設トンネルの改築に際しては、既に発生しているゆるみ域に打設することになるが、ロックボルトはゆるみ域内で止めた方が良いのか、ゆるみ域内を越えて安定した地山まで打設した方が良いのかが課題になる。そこで、本研究では、ボルトの打設時期の違い（ゆるみ域の有無）およびゆるみ域に打設されるロックボルトの長さが、ロックボルトの支保効果へ及ぼす影響を把握することを目的として、ボルトの打設時期を変化させた落戸実験およびその数値解析を実施した。

1)	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）	
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	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. 実験方法

図-1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 $\phi=1.6\text{mm}$ のリン青銅丸棒に定着力を確保するため表面に砂を付着させたものを使用し、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地山作成直後にボルトを設置して、落戸を降下させるケース(降下前打設)②無対策状態で一旦ある程度落戸を降下させ地山にゆるみを与え、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、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. 実験結果

3. 1. 土被り 3D の場合

(1) 無対策の場合

図-2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を始め、降下量約3mm以降はほぼ一定値となった。図-3は降下前と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(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が確認できる。さらに、その形成過程を見ても。図-4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4mm付近から、落戸と共下がりしようとする領域($H=0\sim 10\text{cm}$)とアーチ効果により自立しようとする地表面側の領域($H=17.5\sim 30\text{cm}$)に分かれていくことがわかる。この分離過程により三角形が形成される。なお、ゆるみ域の定義は明確にされていないが、本報告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。

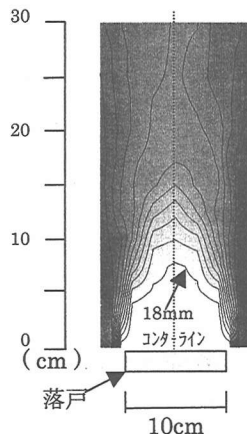


図-3 鉛直変位等高線図(無対策) 図-4 降下量-各深さの沈下量(無対策)

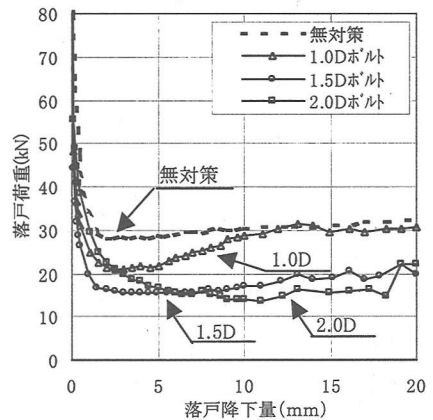
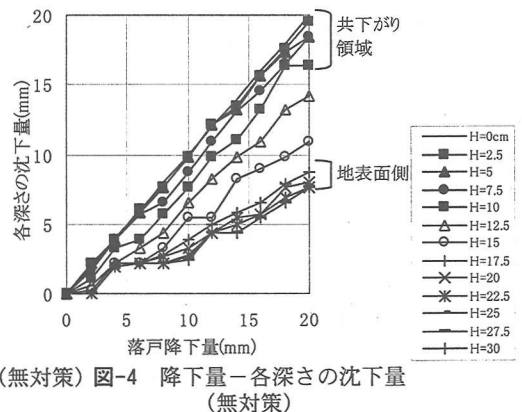


図-2 荷重降下量図(降下前打設)



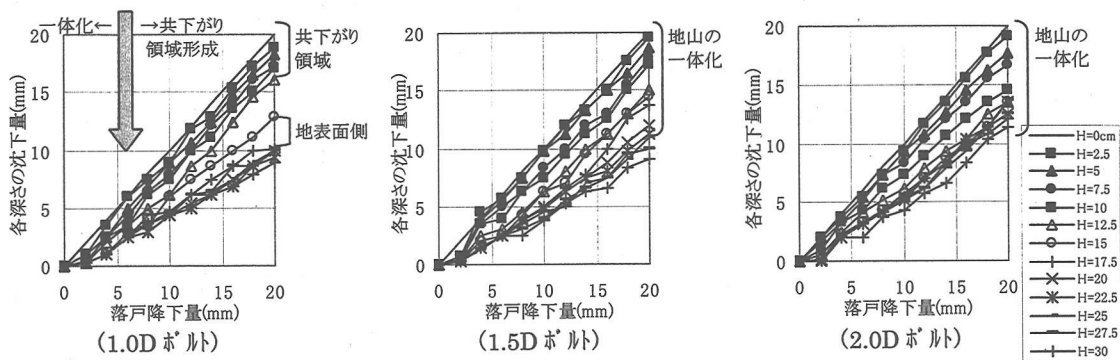


図-5 降下量-各深さの沈下量

(2) 降下前打設のロックボルトの効果

降下前に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場合（事前打設）のロックボルトの効果を確認した。図-2 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、降下量が増加すると効果は徐々に減少し、最終的には無対策と同じ荷重に戻った。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-5 に、1.0D, 1.5D, 2.0D 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-4）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, 2.0D 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、無対策より地表面沈下量が大きくなることも特徴的である。図-6 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、無対策時にくらべ共下が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）段階では効果があるものの、降下量が大きくなると効果はなくなる。

(3) 降下後打設のロックボルトの効果

無対策の場合に共下がり領域が形成される 5mm まで降下させ、共下がり領域（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-7 に落戸降下量と荷重の関係を示す。共下がり領域内にとどまる

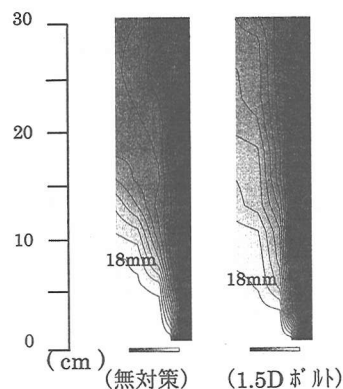


図-6 鉛直変位等高線図
(2mm ピッチ)

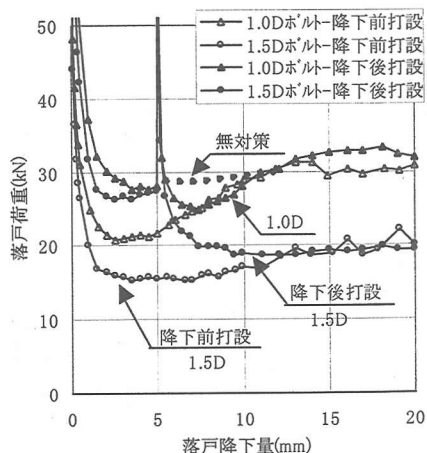


図-7 荷重降下量図
(降下後打設)

程度の長さ 1.0D についてみる。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、再度降下を開始すると急激に荷重が減少し、荷重低減効果が現れた。しかし、降下前打設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、荷重低減降下はなくなった。一方、共下がり領域よりも長い 1.5D 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. 土被り 1D の場合

次に、土被りの影響を見るため、土被り 1D の場合の降下前打設および降下後打設のボルト（ボルト長さ 1.0D）の効果の違いを検討した。図-8 に落戸降下量と荷重の関係を示す。降下前打設の傾向は、土被り 3D の 1.0D ボルトの場合と同じであり、降下量 5mm 程度までは荷重低減効果がみられるが、その後、効果は徐々に減少し、最終的には無対策と同じ荷重に戻った。一方、降下後打設の傾向は、土被り 3D の場合と同様に降下前打設 5mm 程度以降の荷重降下量曲線に重なるが、降下前打設の場合でも降下量 5mm 程度でロックボルトの効果は減少し始めるため、ほとんど効果の現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ボルトの効果は、打設時期の影響が大きく、緩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。これは、実際の地山では、低土被りの場合、天端部のボルトに支保効果が現れにくい場合が多いことに対応しているものと考えられる。

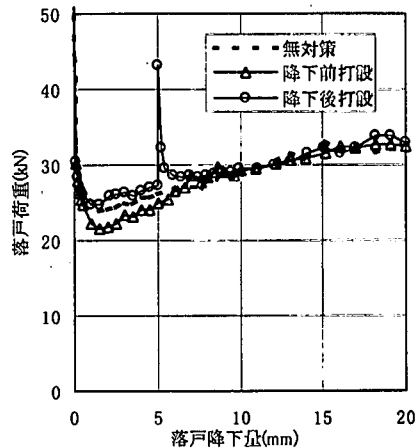


図-8 荷重降下量図
(土被り：1D)

4. 数値解析

(1)解析方法

落戸実験結果の検証をするため数値解析を実施した。これまででも有限要素法による落戸実験の数値シミュレーションが行われ一定の成果⁴⁾を収めているが、ここでは、解析手法として大変形・非線形性の高い現象の再現に向いている有限差分法を用いた。解析コードはFLAC 2Dである。解析モデルは、実験と同じ大きさとし、図-9に示す。解析手順は実際の実験と同様に行う。①初期応力の解析を実施する②落戸に相当する部分(10cm)の支点に微小の強制変位

(0.05mm)を与える。③この状態で解が収束するまで計算を行う。このステップを繰り返し、所定の降下量になるまで解析を行う。なお、各解析収束後、落戸部分の支点反力を合計し、奥行き方向

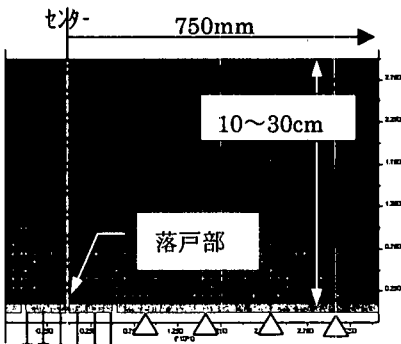


図-9 解析モデル図

表-1 解析定数

地 山 (モー ル・クー ロン)	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	16.0
	弾性係数 (Mpa) ※	1
	ポアソン比	0.3
	粘着力 c (kPa)	0.0
	内部摩擦角 ϕ (degree)	34.5
ロック ボルト (ケ-ブル 要素) 1本当 り	ダイレイタシ- ψ (degree)	10.0
	弾性係数 E (kN/mm ²)	117.6
	ボルト径 (mm)	1.6
	面積 (mm ²)	0.000201
	周長(mm)	5.03
	降伏耐力 (kN)	0.402
	付着剛性 Kb (kN/m/m)	3.844E+2
	付着強度 cb (kN/m)	0.0
	摩擦角度 ϕ (degree)	34.5

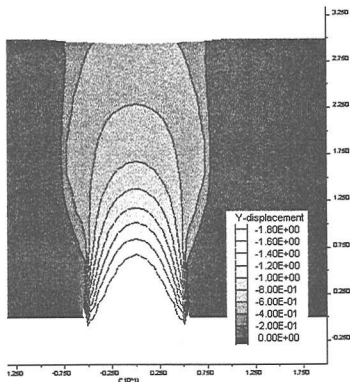


図-10 鉛直変位等高線図
(無対策)

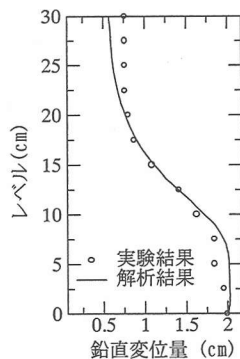


図-11 鉛直変位量図
(センタ-ライン)

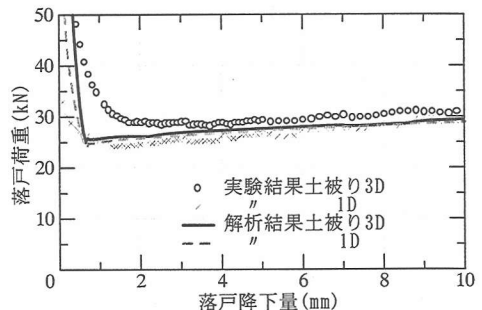


図-12 荷重降下量図
(無対策)

の長さをかけた値が落戸荷重となる。解析定数を表-1 に示す。地山構成則はモールクーロンの式を用いた。また、ボルトは軸剛性のみ働くケーブル要素を用いた。

(2)解析結果

a. 無対策

最初に土被り 3D の無対策時の解析を行った。図-10 に 20mm 降下時の鉛直変位等高線の結果を示す。図-3 の実験結果と比較すると、実験結果と同じように、落戸直上には三角形の共下がり領域が形成されているのが分かる。また、その形状・大きさもほぼ同じである。さらに、落戸中央の高さ方向の各レベルでの鉛直変位量の解析結果と実験結果の比較を図-11 に示すが、定量的にも良い一致を示していることが分かる。次に、図-12 に落戸荷重と降下量の関係の結果を示すが、実験結果と比較すると、最小荷重に到達するまでの降下量は解析結果の方が小さいものの、最小荷重値は良い一致を示していると言える。なお、同図には土被り 1D の結果も併記してあるが、実験結果と良い一致を示している。

b. 対策工 (ボルトあり)

図-13 に土被り 3D でボルトを打設した場合の荷重-降下量の結果を示す。なお、ボルトの解析は落戸降下量 10mm までの結果と比較した。1.5D ボルトの降下前打設の解析結果と実験結果を比較

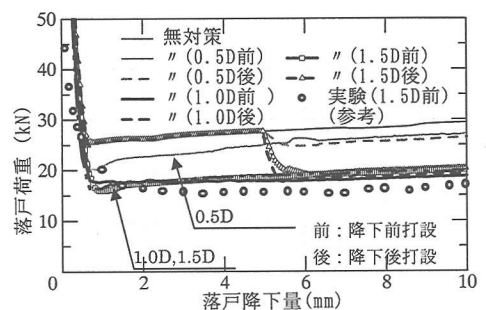


図-13 荷重降下量図
(土被り:3D)

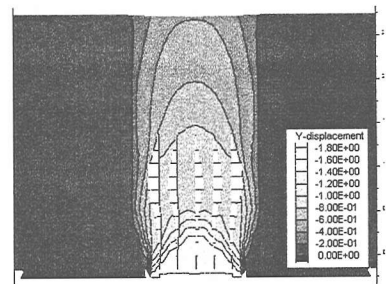


図-14 鉛直変位等高線図
(1.5D ボルト)

すると、ほぼ同程度の荷重低減効果となっているのがわかる。図-14 に鉛直変位等高線図を示すが、無対策に比べ、共下がり領域は小さく、地表面変位が大きくなっており、実験結果の傾向と一致している。次にボルト長の違いを見てみると、図-13 の 1.0D ボルトの荷重-降下量曲線は 1.5D ボルトのものとはほぼ一致し、1.0D ボルトは 1.5D ボルトと同程度の効果となった。0.5D ボルトの場合は、最初は効果あるものの徐々にその効果が小さくなる傾向となった。一方、実験では 1.5D ボルト以上の効果は同じで、1.0D ボルト以下の場合には荷重低減効果が持続しない結果であった。このように、実験では 1.0D ボルトから、解析では 0.5D ボルトからと異なる結果となったが、これは地山を連続体としてモデル化しているが、実際は粒状体の地山であることの影響であると考えられる。次に、降下後打設の効果を見てみる。図-13 の降下後打設の結果を見ると、いずれのボルト長の場合も実験結果と同様に、ボルト打設後の荷重降下量曲線は降下前打設の曲線と一致する結果となり、降下後打設の荷重低減効果が確認できた。

図-15 に土被り 1D の結果を示す。降下前打設の場合を見ると、実験結果より若干大きいものの荷重低減効果が確認できる。一方、降下後打設は、降下前打設に比べてさらに小さな効果しか現れていない。土被り 3D の場合と比較すると荷重低減効果の大きさが小さくなっており、さらに降下後打設の場合は、より顕著になっていることなど、実験結果と同様な傾向を示し、打設時期の違いに対する土被りの影響が大きいことが示された。なお、解析が 4mm 程度降下時に終了しているのは、この時点でボルトと地山の相対変形が大きくなり、計算が発散したためである。土被り 1D の場合は土被り 3D の場合と異なり、地表面まで大きな変形が発生するため、追従できなくなったと考えられる。降下後打設に関しても同様に 9.5mm 降下時に発散した。

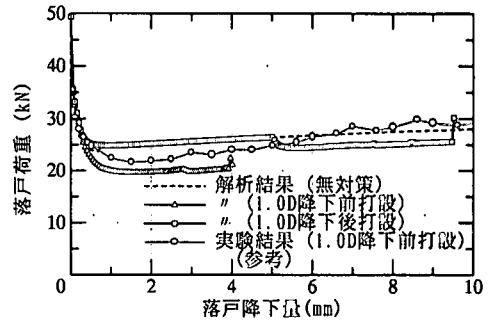


図-15 荷重降下量図
(土被り: 1D)

5. 結論

ボルトの打設時期の違い（ゆるみ域の有無）およびゆるみ領域に打設されるロックボルトの長さがロックボルトの支保効果へ及ぼす影響を把握することを目的として、ボルトの打設時期およびロックボルト長を変化させた落戸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 土被りが 3D の場合は、ゆるみ域（共下がり領域）よりある程度長い（1.5D）ロックボルトを打設した場合は、ゆるみ域が形成された後に打設（降下後打設：5mm 降下時）しても、形成される前にロックボルトを打設（降下前打設）した時と同程度の支保（荷重低減）効果があることがわかった。一方、ゆるみ域高さ程度のボルト長（1.0D）では、降下前、降下後打設とも、降下量が小さい段階では支保効果は認められるが、降下量が大きくなると、最終的にどちらのケースも支保効果がほとんどなくなることがわかった。
- ② 土被りが 1.0D の場合は、土被り 3D に比べると荷重低減効果が小さく、特に、降下後打設ではほとんど効果がない場合があり、打設時期の影響が大きいと言える。これは、実際の新設トンネルでは、低土被りの場合、天端部のボルトに支保効果が現れにくいことに対応しているものと考えられる。
- ③ 有限差分法による数値解析を行ったが、無対策時、ロックボルト打設時とも実験結果の妥当性が検証できた。
- ④ 解析による実験結果および数値解析結果から総合的に判断すると、土砂地山のロックボルトの効果としては、地山のブロック化（地山の一体化）と考えることができる。

参考文献

- 1) 蒲田浩久、真下英人、長谷川哲也：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、トンネル工学研究論文・報告集第10巻、PP147-152、2000.11
- 2) 山本稔：ロックボルトの作用効果について、土木学会論文報告集 第277号、P17-24、1978. 9
- 3) 鈴木崇史、土門剛、今田徹、西村和夫：ロックボルトの支保効果の研究、土木学会第55回年次講演会 III-B75、2000. 9
- 4) 野口利雄、垂水尚志：砂地盤中のトンネル掘削に伴う荷重の再配分に関する基礎的研究、土木学会論文集534号VI-30、P77-85、1996. 3