

ベアリングプレートの有無による ロックボルト作用メカニズムの差違

Mechanical Behavior and Support Effect of Rockbolt Considering with Setting Bearing Plate

土門 剛¹・西村和夫²
Tsuyoshi Domon and Kazuo Nishimura

¹正会員 東京都立大学大学院助手 工学研究科 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)

E-mail: dom@ecomp.metro-u.ac.jp

²正会員 工博 東京都立大学大学院教授 工学研究科 (同上)

Model tests in which we adopted axisymmetrical tunnel models with bolts were performed in order to clarify the difference of mechanical behavior or support effect between with bearing plates or without plate.

The results of a series test indicated that i) in case of plated bolts, the axial force on the bolt have the maximum value at bolt head, ii) in case of unplated bolts, the axial force on the bolt have the maximum value at near the middle of bolt, iii) tunnel wall displacement become smaller in case of plated bolts rather than unplated bolts.

Key Words : rockbolt, bearing plate, support effect, model test

1. はじめに

主要支保部材として用いられているロックボルトは、ベアリングプレートをトンネル壁面に確実に密着させて設置しなければ補強効果が得られないことは従来から指摘されている。しかし、ベアリングプレート設置の良否あるいはプレートそのものの性質がトンネル挙動に及ぼす影響に関しては、これまであまり研究として取り組まれてはこなかった。

ベアリングプレートの有無によるロックボルトの作用効果の差違に関しては、ボルト単体での要素試験的な実験によって定性的に論じられてはいる。たとえば、山本¹⁾は、ベアリングプレートを有する場合のロックボルトには、ボルトによる自己つり合い作用が出現することを見出している。また、西岡²⁾は、ベアリングプレートを有する場合にはそれがない場合に比べて支保効果が大きくなることを実験により明らかにしている。一方、海外では、OresteとPeila³⁾のようにベアリングプレートの剛性を考慮し、それによる支保内圧を仮定したロックボルトモデルを提案したような

例も出始めている。

著者らは、低強度地山トンネルにおける全面接着式ロックボルトの作用効果について模型実験および理論解析により明らかにしてきた。そこでは、ベアリングプレートによる効果をトンネル挙動問題として捉え、ボルト単体の評価ではなくシステムティックに打設されたボルトの支保効果として評価してきた。ひとつの結論として、地山ーロックボルト間の相互作用によりロックボルトに軸力を発生させ、それがベアリングプレートを介してトンネル壁面に支保内圧を与えることを実証したが、ベアリングプレートを有する場合の支保効果のみを論じてきた⁴⁾。ここに来て、逆にベアリングプレートを有しないボルトだけの場合には支保効果が得られないのか、あるいはプレートを有する場合よりもその効果は低いかもしれないが、無支保と比較してプレートのないボルトだけの支保ではどの程度の効果が見られるのか、という興味を抱くに至った。

そこで、ベアリングプレートの有無によるロックボルトの作用メカニズムの差違や、またその結果としてトンネル壁面変位抑制効果はどのように

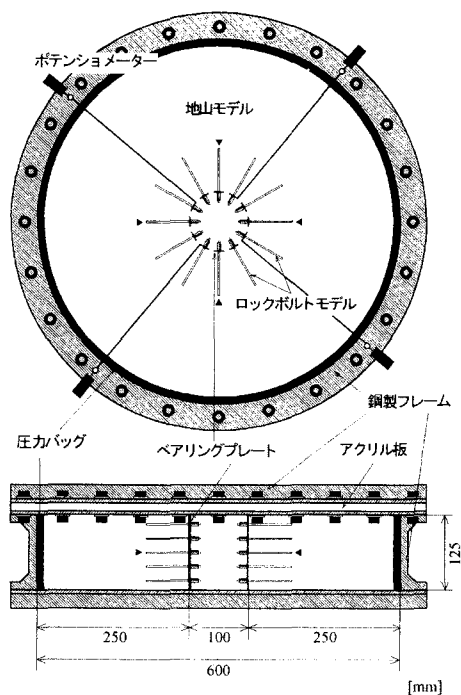


図-1 実験土槽

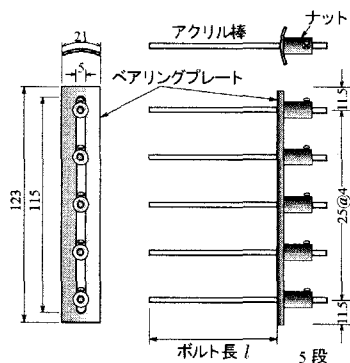


図-2 ボルトおよびベアリングプレートモデル

改善が見られるのか等について明らかにするため模型実験を実施した。本報告では、その実験結果と簡単な考察を加えたのでここに報告する。

2. トンネル模型実験概要

(1) 実験装置

a) 実験土槽および荷重装置

軸対称平面ひずみ条件を再現するため、図-1のような鋼製の円形土槽を用いた。荷重圧は、サーボコントローラによって圧力制御で吐出される水

を、実験槽内壁に設置したゴム製圧力バッグに供給することにより、模擬地山の外周から等方的に与える。

b) トンネルモデル

トンネルモデルは直径 100mm の円形とし、図-2に示すように肌落ち防止をかねた厚さ 0.5mm のアルミ製ベアリングプレートと、アクリル製のロックボルトモデルから構成される。ベアリングプレート中央には縦長の穴が設けられており、所定の軸ピッチでロックボルトモデルを配置できるようにしている。ベアリングプレートをトンネル壁面に設置する際には、隣接するベアリングプレートの長辺どうしがトンネルの内空変位にともなって互いに接触して変形を拘束しないよう若干隙間をあける。

なお、ベアリングプレートのない実験では、このベアリングプレートを設置しないまま外圧を載荷する。

c) ロックボルトモデル

ボルトモデルは地山と十分な付着強度を発揮するとともに、荷重にともなって発生する軸力が有意な値として計測されるものでなければならない。したがって本実験では、ボルトモデルの断面積を大きくすることによってこの条件を満足させる。軸力計測用のロックボルトには、実験槽上蓋と底版の摩擦の影響が少ない中央 1 断面に配置されたボルトのうち、十字を形成する 4 本のみひずみゲージを貼付した（図-1 中▲印のボルト）。軸力計測用ボルトモデルは、断面が二等辺（一辺 3mm）直角三角形の 2 本のアクリル棒の斜辺が互いに交差し、両側面どうしをアクリル溶剤で接着して 1 本の計測用ボルトモデルとする。

d) 地山モデル

地山材料には、硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを 70 : 21 : 9 の重量比で練り混ぜた人工材料を使用する。硫酸バリウム系材料を用いた理由には、1) 地山にある程度粘着力を持たせることができる、2) 締め固め圧によって所定の強度を発現させることができる、3) 水を使用しないため実験中に地山物性がほとんど変化しない、ことによる。

(2) 実験手順

実験の都合上、地山モデルの完成後にロックボルトモデルを挿入することが困難である。そこで、地山材料は軸方向のボルト打設本数に対応した層数に分け、各層所定の上載圧で締め固めて地山モデルを作成する。一層締め固め終了後にロックボルト

表-1 実験ケース

実験ケース	ボルト打設間隔		ベアリングプレート の有無	ボルト長 (cm)
	軸方向 (cm)	円周方向 (deg.)		
053025B	2.5	30	あり	5.0
053025N			なし	
103025B			あり	10.0
103025N			なし	

表-2 地山・ロックボルトの緒元

地山モデル	材料	硫酸バリウム系
	単位体積重量 (γ)	15 kN/m ³
	弾性係数 (E_r)	5 MPa
	一軸圧縮強度 (q_u)	64 kPa
	粘着力 (c_f)	19 kPa
	内部摩擦角 (ϕ_r)	30 deg.
	ポアソン比 (ν_r)	0.4
ロックボルト モデル	材料	アクリル
	弾性係数 (E_b)	4,000 MPa
地山-ボルト間	粘着力 (c_f)	5.9 kPa
	摩擦角 (ϕ_f)	24 deg.

ト断面分を配置し、引き続き次層の材料を詰めて同様に締め固める。地山材料すべて打設後にトンネル型枠を引き抜き、ベアリングプレートのあるケースでは、さらにベアリングプレートを設置しボルト頭部にナットを取り付けてネジ締めして固定する。この作業を終えた後、地山モデル上面にも底面と同じテフロンシート片を敷き詰め、さらに上蓋をのせてボルト締めする。なおこのテフロンシート片は、間にシリコンオイルを塗布して2枚を重ねたもので、形は円弧形をしている。このシート片を互いにオーバーラップさせて土槽上下面に配することにより地山との摩擦の軽減を図っている。

実験は荷重速度 10kPa/min で地山モデル外周から圧力バッグによって外圧を与える。また、最大荷重圧は実験ケースによって若干異なるが、約 300kPa までとした。

(3) 計測概要

トンネル壁面変位計測については、荷重枠外側にポテンシオメータを4個設置し、トンネル内壁とポテンシオメータをつなぐ針金の移動量から壁面変位を計測する。ボルト軸力については、前述の通り4本の計測用ボルトに貼付されたひずみゲージのひずみ値に、あらかじめ引張り試験によって求めた校正値を乗じて軸力を求める。これらの計測値は荷重開始と同時に10秒間隔で取り込

む。

(4) 実験ケースおよびモデル物性

実験ケースは表-1に示されているように、トンネル軸方向と円周方向の打設間隔は固定して、ボルト長とベアリングプレートの有無の組み合わせにより4ケース実施した。

地山モデル、ロックボルトモデルおよび地山-ボルト間の地山物性は表-2の通りである。

3. 実験結果

(1) ベアリングプレートの有無によるロックボルト軸力発生メカニズムの差違

図-3(a)および(b)は、それぞれボルト長5cmのベアリングプレートのある場合とない場合の荷重に伴うロックボルト軸力分布の変化を示している。どちらも荷重圧の小さい段階(100kPa)からボルト全長にある程度の軸力が発生し、荷重圧の増加に伴って軸力も増加しているが、その分布形状は明らかに異なっている。

ベアリングプレートのある(a)では、荷重初期の段階から300kPaまで一貫してボルト頭部すなわち

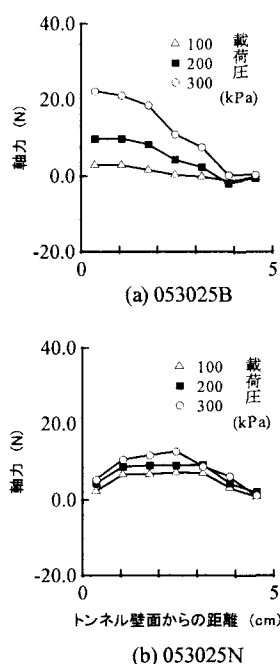


図-3 荷重に伴うボルト軸力分布の変化

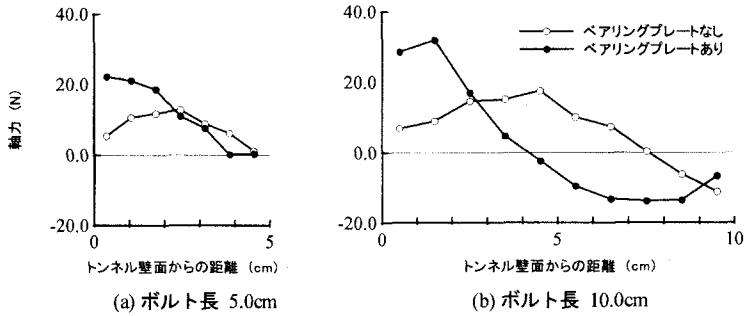


図-4 ボルト長の違いによる軸力分布形状の差違 (載荷圧 300kPa 時)

トンネル壁面近傍で軸力が最大値を呈している。一方、ベアリングプレートのない(b)では、ボルト頭部および先端部がほぼゼロで、ボルトの中間部付近に軸力の最大値を有する分布となっている。ベアリングプレートがないと、ボルト頭部においては自由境界であるため軸力は生じない。このことが実験でも確認された。それに対してベアリングプレートを設置した場合の(a)では、トンネル壁面において地山とボルトの相対変位が生じない。そのため地山奥にいくにしたがってボルトの周面に作用する摩擦力は、いわゆるアンカー作用として働く方向に生じ、その結果ボルト軸力がトンネル壁面すなわちボルト頭部で最大値となる凸型の軸力分布となっている。

次に、ベアリングプレートの有無による軸力分布の差違がボルト長によってどうなるかについて見てみる。図-4(a)および(b)は、それぞれ載荷圧 300kPa 時のボルト長 5cm および 10cm におけるベアリングプレートの有無による軸力分布を表している。先に述べたのと同様に、ボルト長が 10cm においてもベアリングプレートがある場合にはほぼボルト頭部で最大値を呈し、ない場合にはボルト頭部の軸力はゼロに近い値となっている。なお、ボルト長が 10cm において地山奥側に圧縮力(マイナス値)となっているのは、外圧載荷実験に生じる特有の現象である。完全弾塑性理論に基づいて地山内変位分布を求めると、ちょうどボルトの存在する位置で最小値を有する下に凸の曲線となる。この最小値からトンネル内空側においては軸力が引張となり、逆に地山奥側において圧縮となる。この最小値の位置は、支保内圧がない、つまりベアリングプレートがない場合には約 7cm、ある場合には 5cm となり、実験における引張-圧縮遷移点とほぼ一致していることが確認された。

(2) ベアリングプレートの有無によるロックボルト周面に作用するせん断応力の差違

図-5(a)および(b)は、それぞれボルト長 5cm のベアリングプレートのある場合とない場合の載荷圧 300kPa におけるロックボルト周面に作用するせん断応力分布を示している。このせん断応力は、ひずみ計測ポイント間の軸力差と計測ポイント間の距離から求めている。図中、マイナスのせん断応力は、地山がロックボルトの変位を抑制する方向に作用するせん断応力で、アンカー作用が働いていることを意味し、逆にプラスのせん断応力はロックボルトが地山の変位を抑制する方向、つまりピックアップ作用として機能していることを意味する。

図から明らかなように、ベアリングプレートを

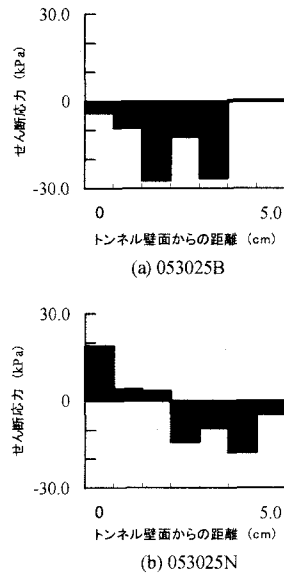


図-5 ボルト周面に生じるせん断応力分布 (載荷圧 300kPa 時)

有する(a)の場合には、ボルト全長にわたってほとんどアンカー作用として機能していることがわかる。一方、ベアリングプレートのない場合には、トンネル壁面側ではピックアップ作用、地山奥側にいくと逆にアンカー作用となる形態を示している。ベアリングプレートのない場合のこうした形状は従来から概念として提示されているが、ベアリングプレートがある場合の形状は著者らを除いて確認されていないと思われる。今後は、ベアリングプレートが設置されている場合の軸力およびせん断応力のメカニズムについて改めて見直し、これを表現するモデルを構築しなければならない。

(3) ベアリングプレートの有無によるトンネル壁面変位抑制効果の差違

図-6は、無支保、053025N(ベアリングプレートなし)および053025B(ベアリングプレートあり)の、载荷に伴う壁面変位を示している。縦軸は、トンネル壁面変位をトンネル半径(5cm)で除した割合を表している。

これによれば、無支保、ベアリングプレートなし、そしてベアリングプレートありの順に壁面変位抑制効果が発揮されていることがわかる。無支保の場合には、载荷圧が増すに従って壁面変位も急増する傾向になるが、ベアリングプレートがある場合には、载荷圧が増加すると壁面変位は増えるものの、その増加率はそれほど高くない。ベアリングプレートのない場合は、無支保とある場合の中間的な挙動となっている。ただし、载荷圧が200kPaを超えたあたりで曲線の傾きが大きくなっていることから、この点でボルトのみによる支保の限界に達したのではないかと考えられる。

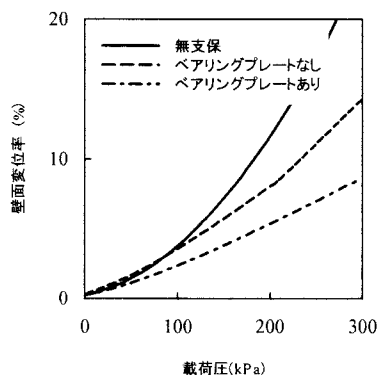


図-6 载荷圧と壁面変位率の関係

4. ベアリングプレートの有無によるロックボルト作用メカニズムの概念

以上により、ベアリングプレートの有無によってロックボルトの軸力分布および周囲のせん断応力分布に代表される作用メカニズムが異なることが明らかとなった。これを概念的に表現すると、図-7のようになる。

本図は上段から順に、地山およびロックボルトの半径方向変位、ロックボルト周囲に作用するせん断応力およびロックボルト軸力について示している。同図(a)はベアリングプレートのない場合のロックボルトの力学モデル(以下、従来モデル)で、同じく(b)はプレートのある場合のモデルである。

まず、従来モデルの概念について説明する。従来モデルでは、地山とロックボルトのトンネル半径方向変位分布、ボルトせん断応力および軸力分布は、Freeman⁵⁾やHyett⁶⁾らなどが提示しているのと同等である。

一方、ベアリングプレートを有する場合のロックボルト挙動の概念については、実験結果から図-7(b)のように概念的に表せる。

トンネル壁面においてベアリングプレートが地山とロックボルトを完全に一体化させていれば、

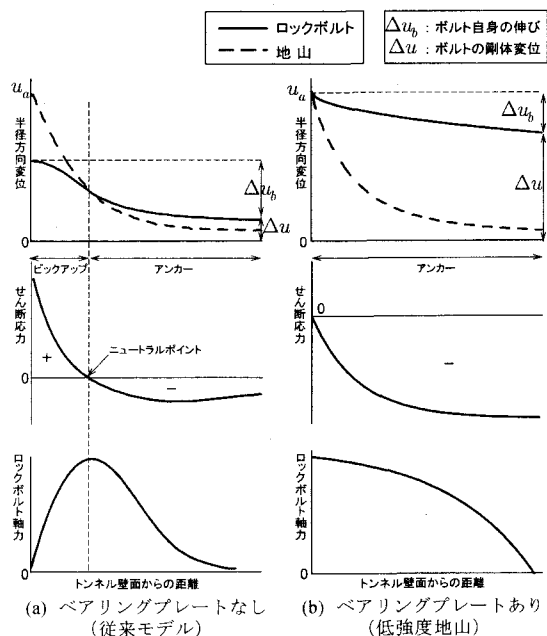


図-7 ロックボルト軸力およびせん断応力の概念¹⁾

地山とボルトの半径方向変位 u_r は一致する。しかし、低強度地山では地山の剛性に比してボルトのそれが極めて大きいので、地山奥側に向かうにしたがって両者に大きな変位差が生じる。つまり、地山の変位は同図 (b) 上段の破線のようになるが、ボルトの半径方向変位はボルト自身のわずかな伸び分 Δu_b を除き、ほとんどがボルトの剛体変位 Δu となる。この両者の変位分布の関係から、同図 (b) 中段のせん断応力分布となる。

せん断応力分布はトンネル壁面においてゼロ、地山奥側に向かうにしたがって地山がボルトをアンカーしようとする向き（ボルトには地山奥側に向かう方向）のせん断応力が増加する。このせん断応力はやがて付着強度の限界と一致して一定の分布となる。このせん断応力を積分した結果が同図 (b) 下段の軸力分布である。

したがって、軸力分布はトンネル壁面において最大となり、ボルト先端に向かうにしたがってゼロとなる上に凸な分布を呈す。

ベアリングプレートの有する場合のこの概念に基づけば、ボルト頭部に発生した軸力が支保内圧を与えると捉えることができる。

5. おわりに

本研究により、ベアリングプレートの有無によるロックボルト作用メカニズムおよびトンネル壁面変位抑制効果の差違が見出せた。ベアリングプレートがある場合には、それが無い場合に比して壁面変位抑制効果に優れており、ボルトの補強効果の一つとされる支保内圧効果も明確に表現できることが明らかとなった。ただし、ベアリングプレートの無い場合でも、無支保に比べて壁面変位抑制効果が向上していることから、今後はベアリングプレートの無い場合の理論的解釈も検討していきたい。

実現象では、本実験におけるベアリングプレートのある場合のような挙動となるケースはまれであるかもしれない。むしろ、ある場合とない場合の中間的な挙動となるケースが多いように思われる。したがって今後は、そのような中間的な挙動を理論的に評価して実地山におけるロックボルト支保の設計手法確立に反映させたいと考えている。

参考文献

- 1) 山本稔：ロックボルトの作用効果について，土木学会論文報告集，No.277，pp.95-104，1978.
- 2) 西岡哲，広井恵二，鄭光司：ロックボルトおよびベアリングプレートの作用効果に関する実験，土と基礎，Vol.34，No.2，pp.11-17，1986.
- 3) Oreste, P. P. & Peila, D.: Radial Passive Rockbolting in Tunnelling Design with a New Convergence-confinement Model, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 33, No.5, pp.443-454, 1996.
- 4) 土門剛，今田徹，西村和夫：ロックボルトによる支保内圧効果を考慮した低強度地山トンネルの簡便モデル，土木学会論文集，No.722/III-61，pp.149-167，2002.
- 5) Freeman, T.J.: The behavior of fully-bonded rock bolts in the Kielder Experimental tunnel, *Tunnels & Tunnelling*, pp.37-40, 1978.
- 6) Hyett, A.J., Moosavi, M. & Bawden, F.: Load Distribution Along Fully Grouted Bolts, With Emphasis on Cable Bolt Reinforcement, *Int. J. for Num. & Anal. Meth. in Geomech.*, Vol.20, pp.517-544, 1996.