

連続体地山のロックボルト作用効果に関する模型実験

MODEL TESTS ON THE SUPPORT EFFECTS OF ROCK BOLTS IN CONTINUOUS GROUND

土門 剛¹⁾・今田 徹²⁾・西村和夫³⁾

Tsuyoshi DOMON, Toru KONDA and Kazuo NISHIMURA

Rock bolting are widely and commonly employed to maintain the stability of a tunnel even in soft rock tunnelling. However, little is known about the support effect of rock bolts in soft rocks, although to obtain the quantitative support effects has been an object of study for a long time.

In order to clarify the mechanical behavior and support effect, we have performed loading tests with artificial ground modeled a continuous soft rock, in which various parameters were combined and used. In this paper, we described only the test cases with the parameter of bolt length and longitudinal bolt spacing. As a results, it was clarified that the support effect increased with density of the bolt spacing rather than bolt length if bolts were in the elastic zone.

Keywords: rock bolts, model test, loading test, continuous ground, axial force distribution

1. はじめに

ロックボルトはトンネルの安定を図るための支保部材として軟岩から硬岩まで広く用いられており、きわめて効果的な支保工であることが経験的に知られている。硬岩におけるロックボルトの設計については Rabcewicz¹⁾、Lang²⁾の理論的、実験的ならびに経験的研究の結果から、ロックボルトの挿入間隔およびその長さを求める方法が提案され、一般に広く用いられている。硬岩に対するロックボルトの作用効果が主として不連続面に沿う岩塊の移動を抑止してアーチとしての安定性を確保すること³⁾を考えると、この効果を発揮させるための簡便な指標として提案した Lang の方法はわかりやすい。

しかし、軟岩のように連続体として挙動すると考えられる地山に対するロックボルトの作用効果は、硬岩の場合とは明らかに異なる。すなわち、不連続面のいわゆる縫付け効果^{3,4,5)}ではなく、ロックボルトをシステムティックに打設することによって内圧効果を発揮させ、地山自身の強度ならびに変形能力の改善にあると考えられている。したがって、ロックボルトが挿入された連続体地山の挙動を、ロックボルト打設パターンによる内圧効果や内空変位抑制効果といった観点から評価する必要がある。

連続体地山としての挙動にロックボルトがどのような影響を与えるかを解明するために、模擬地山を用いたトンネル模型実験やロックボルト単体の引抜き試験をはじめとする要素試験など多くの実験的研究が試みられているが、いずれも定性的な効果を確認するか、あるいは、若干のパラメータの影響を明らかにするにとどまっているのが現状である。また最近になって、定量的評価を試みる研究⁶⁾も一部にはみられるようになったものの、実設計に適用されるまでには至っていない。

1)正会員 東京都立大学大学院工学研究科 助 手 土木工学専攻

2)正会員 工学博士 東京都立大学大学院工学研究科 教 授 土木工学専攻

3)正会員 工学博士 東京都立大学大学院工学研究科 助教授 土木工学専攻

こうした流れを踏まえ、定量的評価が可能だけでなく実設計で汎用され得る簡便な力学モデルの構築を視野に入れて、本研究の目的を、模型実験による基礎データの収集と位置づけた。そこで、ボルトに関するパラメータとして半径方向および軸方向打設ピッチ、ボルト長、ボルト表面加工の有無、およびベアリングプレートの有無等を選択し、膨大な数に及ぶトンネル模型実験を実施し、連続体地山におけるロックボルトの作用機構およびその支保効果について整理した。本報告ではこのうち、ボルト長および軸方向打設ピッチ（以下、軸ピッチ）からみたトンネル支保効果についてのみ言及する。

2. 載荷実験

2.1 実験装置およびトンネル・地山モデル

(1) 実験装置

実験は単純化のために、図-1のような円形鋼製土槽を用い、その内壁に設けられた載荷用ゴム製圧力バッグによって、打設した模擬地山およびその中心に設置したトンネルモデルを平面ひずみ条件下で等方載荷するシステムである。これ以外には、圧力バッグに圧力（水圧）を供給するためのコンプレッサーおよびサーボコントローラー、そしてロックボルト軸力を計測する静的ひずみ計測器によって構成されている。また、載荷に伴うトンネル内空変位を計測するために載荷枠外側にポテンシオメータを4点設置し、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内空変位を求めた。

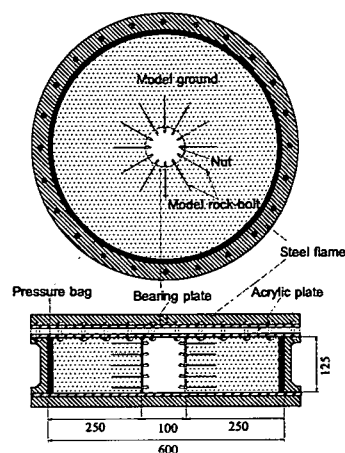


図-1 実験土槽

(2) トンネルモデル

トンネルモデルは、図-2に示すように肌落ち防止工もかねたベアリングプレートとして厚さ 0.5 mm でトンネル半径と同一の曲率を持つアルミ板で模擬し、板中央に設けられた縦長の穴に所定の軸ピッチのロックボルトモデルおよびナットを模擬した固定具を取り付けられるようになっている。なお、隣接するアルミ板の長辺どうしが、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て設置した。

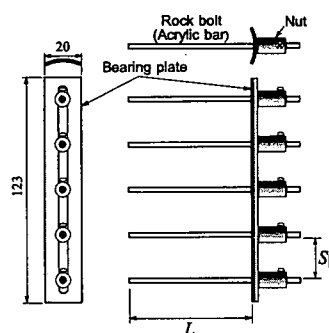


図-2 肌落ち防止工とボルトモデル

(3) 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、載荷中逐次計測される軸力が有意な値として得られる寸法でなければならない。したがって、本実験では 3mm 角の断面の亚克力棒を用いた。なお、軸力計測用のロックボルトとして、上蓋と底版の影響が少ない真中の1断面に配置された12本のボルトのうち十字方向に配置した4本のみひずみゲージを貼付した。

(4) 地山モデル

地山材料には、硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを重量配合比で 70 : 21 : 9 の人工材料を使用した。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任意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不変である、等による。

2.2 実験ケース及び方法

(1) 実験ケース

実験は、表-1に示されているように、ボルト長および軸ピッチの2つをパラメータとして7ケース（ロックボルトを挿入しない無支保トンネルを含む）実施した。なお、半径方向打設間隔についてはボルトを打設したケース全て1断面

あたり等間隔に 12 本 (30°ピッチ)とした。

(2)実験方法

地山材料は軸ピッチに応じて数層に分けて土槽に詰め、各層所定の上載圧で締め固めて地山モデルを作成した。一層締め固め終了後にロックボルト一断面分12本を配置し、引き続き次層の材料を詰めて同様に締め固める。最終的に、層厚が 12.5 cm になるまでこの作業を繰り返す。地山材料作成後トンネル型枠を取り除き、肌落ち防止工も兼ねたベアリングプレートを挿入し、さらに各ボルトにナットを取り付けて締め付ける。この後上蓋をボルト締めしてから油圧サーボコントローラにより載荷速度 0.01 MPa/min で外荷重を載荷した。載荷は実験ケースあるいは崩壊状況によって若干異なるが、ほぼ 0.30 MPa までとした。

3. 実験結果ならびに考察

3. 1 トンネルの支保効果について

3. 1. 1 載荷圧－内空変位関係

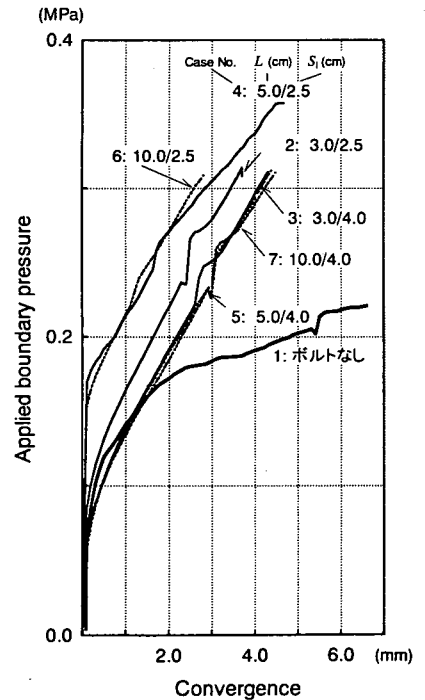
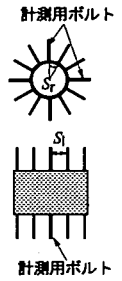
図－3からロックボルトの地山変形抑制効果を確認することができる。無支保とロックボルトを設置したいずれのケースでも、載荷初期の挙動は全く同じものであるが、変形が現れる載荷圧に差が生じた。無支保のケースでは 0.10MPa 未満で変形が生じ始めるが、ロックボルトを打設した場合、特に軸ピッチが 2.5cm のケースでは、ほぼ2倍の約 0.17MPa でようやく変形し始めている。

また、トンネル壁面の地山が塑性化するとその後の挙動は全く異なったものとなる。特にその変形の傾きに大きな特徴が現れている。無支保の実験では傾きが水平に近く、いったん変形を生じるとそれ以降はさらに荷重をかけることなく変形が増大していく。実際に目視によって地山が 0.30MPa に至らずに 10%以上もの大変形を生じて崩壊している様子が観察された。一方ロックボルトを設置した実験では無支保の場合と比較してその傾きが大きく、塑性変形が生じ始めても一定の耐力を有していることがわかる。これはロックボルトが、ロックボルトと地山との摩擦によるせん断力で地山の変形を抑制しているためと考えられる。

また、本実験ではロックボルトが滑りを生じる段階にまで至っていないが、ロックボルトが付着強度を越えて滑り始めるとトンネルの変形もより大きくなり、荷重変位曲線の傾きが小さくなると考えられる。ロックボルトが地山との付着強度を越えたり、軸力がロックボルト部材の強度を越えてしてしまわない限り、地山の変形に追従してその支保効果を維持し続ける。ここに吹き付けコンクリートの様な支保工との支保機能の差がある。吹き付けコンクリートではその支保圧ではロックボルトを大きく上回るものの過度の変形に耐えることができず破壊してしまうが、ロックボルトは地山の変位に追従しながら効果を発揮する。本実験においても、トンネル内空の変形が 10%を越えてもロックボルトはまだ支保効果を発揮し続けていた。

表－1 実験ケース

Case No.	Bolt length L (cm)	Bolt spacing	
		Radial S_r (deg.)	Longitudinal S_l (cm)
1		ボルトなし	
2	3.0	30	2.5
3			4.0
4	5.0		2.5
5			4.0
6	10.0		2.5
7			4.0



図－3 載荷圧－内空変位

3. 1. 2 軸ピッチの違いによる比較

本実験では軸ピッチとして 2.5cm と 4.0cm の 2通り実施したが、両者では実験結果に明確な差が認められた(同図-3)。ピッチが密な 2.5cm の場合は変形開始の載荷圧が約 0.17MPa 程度であるのに対し、ピッチが粗な 4.0cm では無支保の場合とほぼ同圧の 0.10 MPa 未満で変形し始める。このことから軸ピッチが密なほうが地山をより安定化させるといえる。しかしながら、地山が変形を生じてからの挙動、すなわち支保効果に関しては打設ピッチの明確な差はなかった。

3. 1. 3 ボルト長の違いによる比較

同図-3から明らかなように、ボルト長 5.0cm を基準に考えた場合、ボルト長を 10.0cm と長くするよりも、軸ピッチを 2.5 cm と密にする方が支保効果が大きいことがわかる。しかし、ボルト長 3.0cm ではロックボルトの支保効果があまり期待できない。このことから、緩み領域を越えて弾性領域に届く程度のボルト長を有していれば、それ以上ロックボルトの長さを長くするよりも、打設密度を密にする方が支保効果が大きいといえる。これと類似した結論は土屋⁷も得ている。また、実際の施工ではボルト長が長いほどロックボルトを注入する際の地山の削孔時間が多くなり、1サイクルの施工時間が長くなる。特に膨張性地山のように早期に断面を併合する必要がある場合には、ボルト長を長くするよりも、打設密度を大きくした方が望ましく、施工面から考えてもこの方が良い効果が得られるということになる。

3. 2 ロックボルトの力学挙動について

3. 2. 1 ロックボルトの軸力分布

ロックボルトの軸力分布はいずれの長さの場合にも、ピッチの差によらず同様の分布形状を示している(図-4～6)。特にボルト長 3.0cm、5.0cm の場合にはボルトの大部分で引張力が発生し、なめらかな凸型形状となっている。ただし、ボルト長 5.0 cm では、トンネル壁面からの距離が 4.0cm を越えたあたりから若干の圧縮力が作用し始めているのが確認できる。またボルト長 10.0cm でも同様に、トンネル壁面からの距離が 4.0cm を越えたあたりから圧縮力となり、壁面から 7.0cm 程度のところでその圧縮力が最大となりボルト先端では圧縮力も減少していく様子がわかる。ボルト長 3.0cm ではボルト先端部でもかなりの引張力を生じていることから、明らかにボルト長の不足に起因していると言える。

ロックボルトの軸力分布は、載荷初期段階にはほぼ直線分布であるが、地山の変形が進行していく過程で軸力分布も急激に凸型の形状に変化し、勾配も大きくなる。軸力

分布の勾配は地山とのせん断力の大きさを示しているの、地山の変形とともにロックボルトにも大きなせん断力が

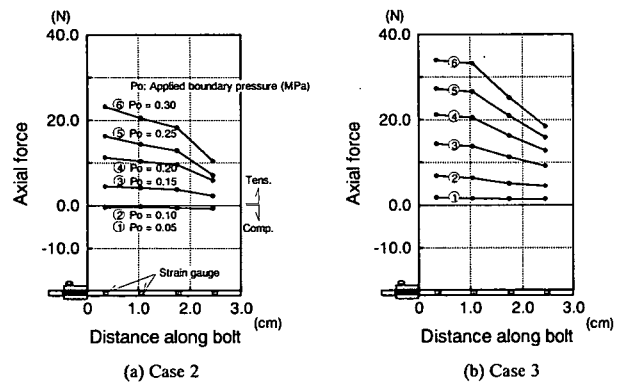


図-4 載荷に伴うロックボルトの軸力分布 (L=3.0cm)

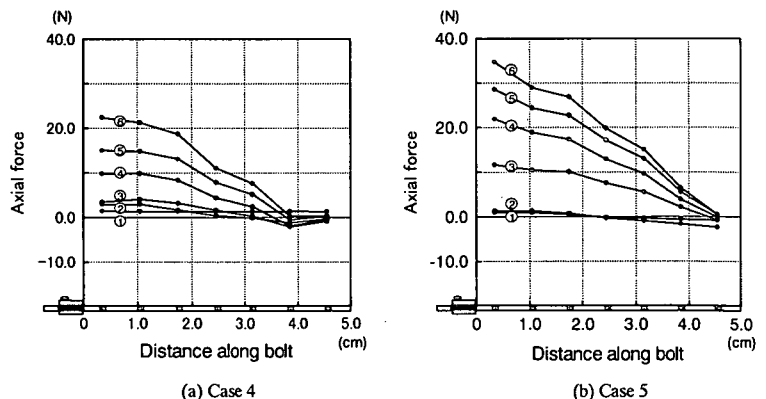


図-5 載荷に伴うロックボルトの軸力分布 (L=5.0cm)

生じることが読みとれる。

また、軸ピッチの違いによってロックボルト頭部に生じる軸力に差が生じていることも確認できる。ボルト1本あたりの受け持つボルト内空面積が大きいケース(粗なケース)では、1本のボルトが負担する荷重はそれだけ大きい。すなわち、地山の変形を拘束するためには大きな軸力を発生させて変形を抑制しようとする。これに対し、その受け持つ面積が小さい場合(密なケース)には、それぞれのボルトが負担する荷重が小さくなり、比較的小さな軸力でも地山を拘束することができる。

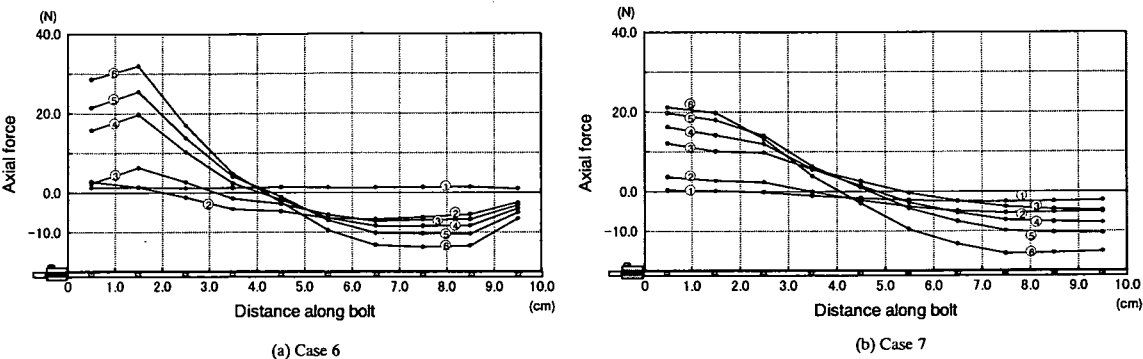


図-6 载荷に伴うロックボルトの軸力分布 (L=10.0cm)

このボルト頭部軸力を1本の軸力が受け持つ面積(トンネル模型 表面積/ボルト総本数)で除すとロックボルト1本あたりのみかけの内圧効果を換算内圧として定量的に求めることができる。その換算値を示した表-2からわかる通り、どのケースでも換算内圧は 30 ~ 40 kPa の範囲内であり、顕著な差は見られない。しかし、別報⁸のボルト密度の最も粗な実験ケース(ボルト長 5.0cm, 半径ピッチ 60°, 軸ピッチ 4.0cm)では、換算内圧が 20kPa であったことから、ボルト密度として、半径・軸ピッチに加え、ボルト総延長も考慮して評価する必要があると思われる。

次にロックボルトに圧縮力が作用する現象について考察する。圧縮力の原因はいくつか考えられる: 1) 地山の変形が実験槽との摩擦によって拘束されてしまい圧縮力が生じる; 2) 地山材料が圧密されるためによるものなどが考えられる。また、地山と実験土槽の摩擦が無視できるものとすれば、この圧縮力はロックボルト設置によってトンネル周辺地山にリングが形成され、リング外側の地山が圧縮されたために生じたものとも考えられる。

3. 2. 2 载荷に伴うボルト頭部の軸力変化

図-7からロックボルトに発生する軸力が地山にどのような効果をもたらしているのかを考察することができる。载荷圧が 0.10MPa までは地山変位はほとんど発生していないので、軸力も地山内に生じたと考えられる地山リングより外側では、地山の圧縮によってボルト先端部の圧縮力しか生じず、ボルト頭部の軸力はほとんどない。しかし地山が変形し始めるとそれにともなってボルト全体に引張力が作用しはじめ、ボルト先端部でも軸力が急激に増加する。しかし、ある荷重を越えるとその増加率も少しずつ減少し始

表-2 ボルト頭部軸力からみた換算内圧

Case No.	1本のボルトが 受け持つ面積 (cm ²)	ボルト頭部軸力 (外圧 0.30MPa 時) (N)	換算内圧 (kPa)
2	6.50	22.9	35.2
3	10.40	33.7	32.4
4	6.50	22.0	33.8
5	10.40	37.5	36.1
6	6.50	28.5	43.8
7	10.40	21.2	20.3

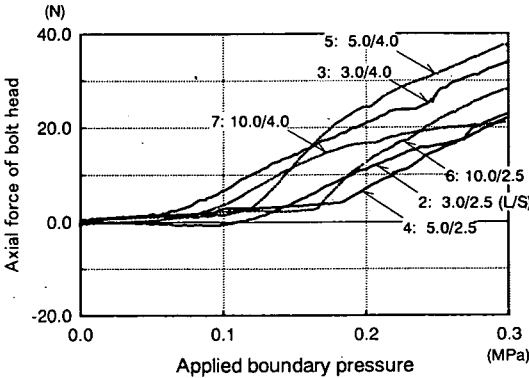


図-7 载荷に伴うボルト頭部軸力変化

める。これは地山の塑性化にともない、トンネル壁面周辺の地山でボルトが地山との付着力を失い始めているためと考えられる。このまま载荷を続けていけば、軸力はピークを迎えて減少し、ロックボルトは滑り始めると考えられる。

このボルト頭部の軸力増加図から次のことが言える。すなわち、ロックボルトの作用効果はトンネル周辺地山が塑性化して変形を生じ始めてから初めてロックボルト頭部に軸力が生じ、地山の安定化の効果を発揮する。大きな変形をともなう地山条件では、ロックボルトにも大きな軸力が生じて時には破断してしまうが、打設しても地山の変形が小さい場合には、ロックボルトには小さな引張力しか作用しないことになる。したがって、必ずしも現場計測でロックボルトの軸力が小さいことを理由にロックボルト打設本数を削減あるいは省略してしまうのは危険となることも考えられる。

4. まとめ

本研究では、ボルト長および軸方向打設ピッチをパラメータとした実験結果についてのみ考察した。その結果を簡単に要約すると、

- 1) 無支保のケースと異なり、ロックボルトを打設したケースでは、トンネル内空の変位はある一定の割合で抑制されることがわかった。また、その抑制の効果はボルト長 5.0cm 以上では、顕著な差はみられない。
- 2) 軸ピッチが 2.5cm のケースでは、4.0cm のケースや無支保のケースと比較して地山の変形ははじめる载荷圧が大きくなることから、トンネル内空の変形抑制効果が大きい。
- 3) ボルト長 3.0cm では打設ピッチを 2.5cm と密にしても変位抑制の効果は小さく、ボルト長の絶対的な不足が原因であると考えられる。このことはボルト内の軸力分布を見てもわかるようにボルト先端部においてもかなりの引張力をもつことからいえる。以上のことから本実験ではボルト長が 5.0cm 以上であればそれ以上ボルト長を長くするよりも、打設ピッチを密にする方が地山の変形を抑制する効果は大きい。
- 4) ロックボルトの作用効果は地山に変形が生じてから発揮されるものであり、変形が極わずかな段階では軸力分布はほぼ直線的な形状となる。ところが、地山の塑性変形が進行するにともない軸力分布は勾配の大きい曲線に変化し、ロックボルトと地山とのせん断力が増加してトンネルの変形を抑制しようとする。
- 5) 軸ピッチが粗なケースほどボルト1本あたりの受け持つ面積が大きくなるため、ボルト頭部に生じる軸力も大きなものとなる。ただし、換算内圧で比較すると、いずれのケースでも顕著な差が見られないことから、ボルト総延長で比較するなど他の要因を見出すことも必要であると思われる。

謝 辞

本研究に関わる一連の模型実験を実施するにあたり、当時、東京都立大学大学院修士 岩井伸夫 君(現 国際協力事業団)には多大な尽力をいただいた。ここに記して深く感謝の意を表する次第である。

参考文献

- [1] Rabcewicz L., "Stability of tunnels under rock load," *Water power* **21**, 266-273 (1969)
- [2] Lang T., "Theory and practice of rock bolting," *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.* **220**, 333-338 (1961)
- [3] Lang T., "Rock reinforcement," *Bull. Assoc. Eng. Geol.* **9**, 215-239 (1972)
- [4] Panek L.A., "Design for bolting stratified roof," *Trans. Soc. Min. Eng. AIME* **229** (1964)
- [5] Tang D.H.Y. and Peng S.S., "Methods of designing mechanical roof bolting in horizontally bedded strata," *Int. Proc. 25th U.S. Symp. Rock Mech.*, Evanston, IL, 615-626, AIME, New York (1984)
- [6] 例えば、蔣ら, "軟岩地山トンネルの安定におけるロックボルトの力学的作用効果", 土木学会論文集 No.561, 19-31, 1997.3
- [7] 土屋, "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, 17-26, 1991.9
- [8] 岩井・土門・今田, "粘着力を有する地山におけるロックボルトの作用効果に関する研究", 土木学会第 53 回年次学術講演会講演概要集 第3部(B), 212-213, 1998.10