

(III－84) 軸対称トンネルのパターンボルティングに関する模型実験

東京都立大学 学生員 松本 浩一
東京都立大学 正会員 土門 剛
東京都立大学 フェロー 今田 徹
東京都立大学 正会員 西村 和夫

1. はじめに

著者らはこれまでに、軟岩のように連続体的に挙動すると考えられる地山において、トンネル周辺の応力状態の変化にもなってロックボルトがトンネルの安定化にどのように効果を発揮しているのかを解明する目的で、ロックボルトを設置したトンネル模型載荷実験を実施してきた。本報告では、ボルトの軸方向および半径方向設置間隔をパラメータとしてパターンボルティングした数ケースの実験結果から、主に内空変位抑制効果に着目し、ボルト設置パターンの違いによるその効果の違いについて考察するとともに、載荷に伴う軸力分布の推移からボルト効果の発現メカニズムについても論じた。

2. 実験概要

(1) 実験装置および載荷方法

軸対称平面ひずみ条件を再現する目的で、図－1(a)のような円形土槽を用いた。実験は、サーボコントローラーによって毎分0.1kgf/cm²の載荷速度で土槽内壁面に取り付けられた載荷用ゴム製圧力バックに水を供給しながら載荷するシステムである。

(2) トンネルおよび地山モデル

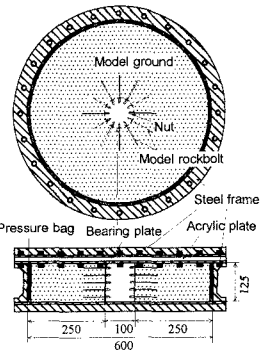
各実験ケースでは、トンネル軸方向中央断面に配置するボルトのうち、4本のみを計測用ボルトとした。計測用ボルトは、直角二等辺三角形(短辺3mm)を断面とする2本のアクリル三角柱の長辺側面に、それぞれ等間隔にひずみゲージを貼付し、その面同士を接着したものである。また、ボルトモデルはトンネルモデル作成後に地山に直接挿入すると、トンネル壁面を痛めるばかりでなく、地山との付着が十分にとれない可能性があるため、本実験では地山材料打設を数層に分け、各層締固め終了時に1断面分のボルトをあらかじめ設置することとした。

トンネルモデルは、図－1(b)のように厚さ1mmで曲率半径がトンネル径と等しいアルミ板をベアリングプレートとして用い、これとロックボルトモデルをナットで固定して一体化させたものを、ボルト設置間隔によって数枚等間隔に配置した構成となっている。なお、両隣りのベアリングプレートが互いに接触して変形を拘束しないように若干間隔をあけて設置した。

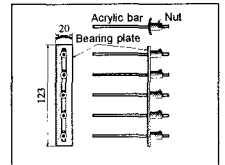
地山モデルには硫酸バリウム、酸化亜鉛、ワセリンを70:21:9の重量比で混合したものを用いた。物性値等は表－1の通りである。

(3) 実験ケース

ボルト長をすべて10cmとし、トンネル半径方向および軸方向のボルト設置間隔をパラメータとして表－2のように6ケースとした。表中、ボルト総延長は、軸方向設置間隔が1.5、2.5および4.0cmのケースではボルト設置断面数がそれぞれ9、5、3断面であるので表に示した数値となる。



(a) 実験土槽



(b) ボルトモデルとベアリングプレート

図－1 実験装置

表－1 地山物性

単位体積重量	1.50 gf/cm ³
弾性係数	70.0 kgf/cm ²
内部摩擦角	30.0 deg
粘着力	0.45 kgf/cm ²
締固め圧2.0kgf/cm ² 時	

表－2 実験ケース

実験ケース	ボルト設置間隔		ボルト長	ボルト総延長
	軸方向 (cm)	半径方向 (deg.)		
3015	1.5	30.0	10.0	1080.0
3025	2.5			600.0
3040	4.0			360.0
6015	1.5	60.0		540.0
6025	2.5			300.0
6040	4.0			180.0

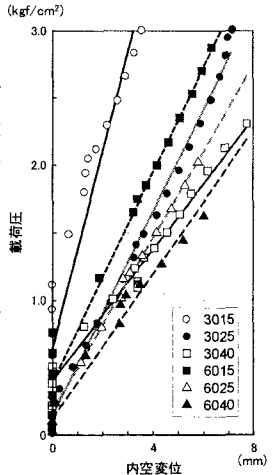
キーワード トンネル、パターンボルティング、軸対称平面ひずみ条件、内空変位抑制効果、軸力分布

連絡先 〒192-0397 東京都八王子市南大沢1－1

3. 実験結果

(1) 内空変位－載荷圧関係

図－2は、全実験結果のプロット(注:グラフを見やすくするため計測データを100秒ごとに抽出)と、内空変位が顕著に現れた後の曲線がほぼ線形であったため、各実験結果の線形近似直線もあわせて示したものである。内空変位が顕著に現れる時の載荷圧に若干ばらつきがあるものの、ボルト設置密度が最大のケース3015で最も内空変位抑制効果に優れ、一方、その密度が最も小さいケースである6040でその効果が最も小さいことが明確に読みとれる。ただし、ボルト総延長のほぼ等しいケース3025と6015を比較すると、立ち上がりの載荷圧に若干の差違があるものの近似直線の勾配がほぼ等しいことから、内空変位抑制効果を論じるにはボルト総延長がひとつの指標になると考えられる。なお、このことは実験ケース3040と6025でも同様である。

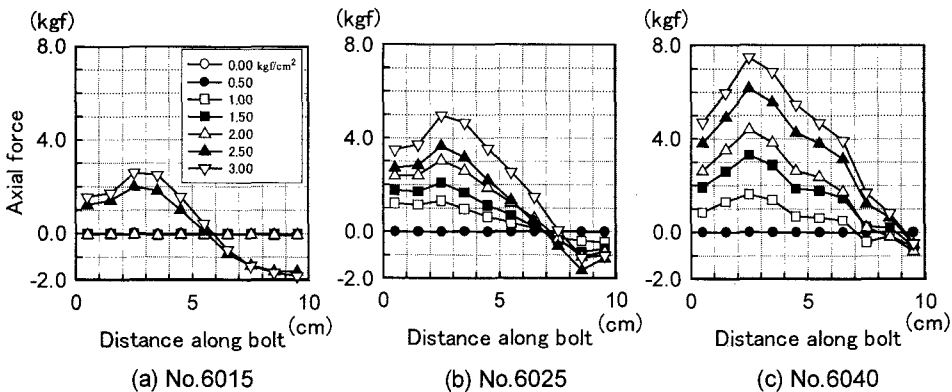


図－2 内空変位

(2) 載荷に伴う軸力分布パターンの変化

ここでは軸力分布の一例として、半径方向設置間隔が 60.0° のケースを図－3(a)から(c)に示す。まず同図(a)では、載荷圧が 2.0kgf/cm^2 までは全く軸力が現れず、その圧力が 2.5kgf/cm^2 を超えると突然現れる。しかし最大載荷圧が 3.0kgf/cm^2 に達しても 2.5kgf/cm^2 時の軸力分布と大きな違いは見られない。また、軸力分布の形状は、ボルト頭部から約 3.0cm 付近で最大引張力を呈し、 5.5cm を超えたあたりから、先端部にかけて圧縮力を示している。これは、他のケースに比較してボルト設置密度が大きいため、郡杭効果的に外圧(載荷圧)に対して圧縮力で抵抗しようとする現象であると考えることができる。

ボルト設置密度が疎になっていくと(同図(b)から(c))、実験ケース6015で生じていた圧縮領域がボルト先端部の方へ移動していくとともに最大圧縮力も小さくなっている様子がわかる。実験ケース6040ではついに圧縮力が現れなくなり引張力が卓越し、その値は最大で約 7.8kgf にも達した。この結果は次のように解釈できる。すなわち、ボルト設置密度が疎なケースではボルト総数が少ないため、1本のボルトが負担する荷重が大きくなるから、地山の変形を拘束するためにはそれだけ大きな軸力を載荷圧の小さい段階から発生させることとなる。これに対して、設置密度が密なケースでは、それぞれのボルトが負担する荷重は小さくなり、実際に最大載荷圧 3.0kgf/cm^2 に達しても他のケースと比較して軸力が小さく、かつ内空変位抑制効果が極めて高い結果となった。



図－3 軸力分布(半径方向設置間隔 60°)

4. おわりに

今回使用したボルトモデルは、貼付するひずみゲージの大きさの制限があったため、トンネルモデル径を 10m と想定すると、そのボルト径は約 30cm にも達する。幾何学的相似則から言えば、実トンネルを再現した実験とはいえないが、軸剛性を大きくとることによって非常にクリアに軸力分布が得られ、その効果も定性的にはあるが明確に把握することができた。今後は、ボルト長、および軸方向・半径方向の設置密度のみを実トンネルで採用されている条件に近づけて追加実験し、これら蓄積したデータを評価して、簡便な力学モデルを構築する予定である。