

粒状体地山におけるロックボルトの 作用機構と簡易設計法

土門 剛¹・徐 景源²・西村和夫³

¹正会員 首都大学東京 研究員 都市環境学部 (〒192-0397 東京都八王子市南大沢1-1)
E-mail:dom@ecomp.metro-u.ac.jp

²学生会員 工修 首都大学東京 博士課程 都市環境学部 (同上)

³正会員 工博 首都大学東京 教授 都市環境学部 (同上)

非粘着性粒状体地山モデルにおいて、ロックボルトのトンネル軸方向打設間隔および地山-ボルト間摩擦特性をパラメータに、円形トンネルの外圧載荷実験を実施した。これにより、ロックボルトの軸力分布からみた作用機構を明らかにするとともに、打設パターンや地山-ボルト間特性の差違によってトンネル内空変位抑制効果が異なることを明らかにした。さらに、実験結果に基づいて、ロックボルト作用効果を加味したトンネル力学モデルを構築し、設計の目安となる指標について考察を加えた。

Key Words : tunnel, granular material, rockbolt, model test, simplified model

1. はじめに

ロックボルトは地山に挿入されると地山と一体化し、地山の変形に応じてボルト軸力が発現する。この軸力を反力として地山に作用させるが、この作用をみかけの支保内圧と捉えることにより、トンネル掘削後の周辺地山の変位をこの支保内圧によって抑制する効果があるとされている。

しかしながら、ロックボルトの作用機構は外見からは確認することができないだけでなく、ロックボルトが適用される地山条件によってその機構が複雑になると考えられるため、理論的に作用機構を解明するのは極めて困難である。

一方、これまでにロックボルトを主要支保部材とするトンネル支保理論も多く提案されているが、単純化や多くの仮定が導入されており、実地山に適用するには十分とはいえない。

こうした背景から、本研究ではまず、ロックボルトの作用機構をトンネル変形に伴う軸力発現とトンネル壁面変位抑制効果との関連からとらえることとし、これを小規模な模型実験により検証する。地山材料には、ロックボルトを有しなければ自立しないような非粘着性粒状体地山を用いることによって、ロックボルトの効果を最大限に発揮させ、その作用機構を明らかにする。

最後に、実験結果を踏まえ、地山-ボルト相互作用を

加味したロックボルトを含むトンネルの簡便な力学モデルを構築し、設計の目安となる指標について考察を加える。

2. ロックボルト力学モデルの概念

ロックボルト頭部には、ロックボルトを地山に確実に固定するためにベアリングプレートが設けられる。このとき、地山の変形にともなってボルトに生ずる軸力はその頭部においてプレートを介して地山にみかけの支保内圧を与えることになる。

これまでのロックボルトの力学モデルでは、Hyett ら¹⁾や著者ら²⁾を除いて、プレートのないロックボルトモデル(従来モデル)が提示されてきた(図-1(a))。しかし、本研究が対象とする地山では、プレートや肌落ち防止工など、ボルト頭部に発現した軸力をトンネル壁面に支保内圧として与える支保工等を多くの場合施工する。したがって、本研究のようにプレートを有する場合、図-1(b)のように先に著者らが提示した概念と同様の挙動となるものと考えられる。

3. トンネル模型載荷実験

(1) 実験モデルの考え方

非粘着性の粒状体地山において、ロックボルトをトン

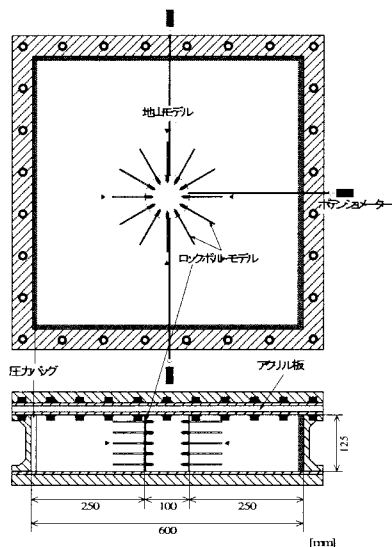
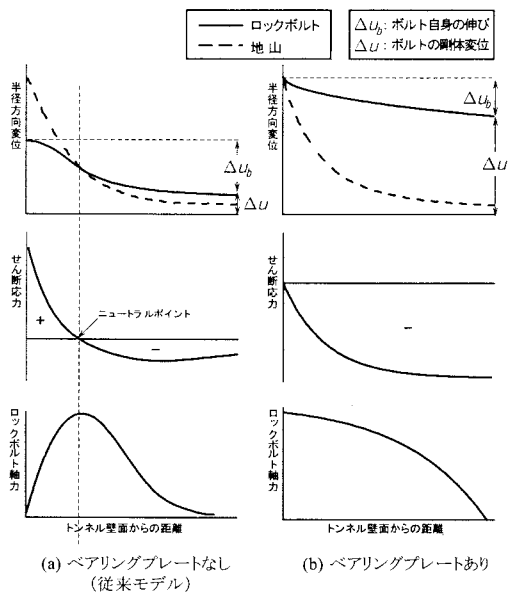


図-2 実験土槽とロックボルトの打設例

ネル軸方向に対称に打設したトンネルをモデル化する。ロックボルトの作用効果を厳密に論じるためには、トンネル掘削、支保工の施工、トンネル周辺地山の変形など、実際のトンネル施工で考えられる作業や挙動をその施工ステップごとに忠実に再現する必要がある。しかし、今回用いた小規模な二次元土槽では、それらのステップを再現することは難しい。そこで、次のような仮定あるいは考え方に基ついて地山やトンネル掘削に伴うロックボルトの挙動をモデル化した。

- 1) 切羽進行に伴う地山変形は、外周を等圧载荷することによって模擬する。
- 2) ロックボルト挿入は地山作成時に行う。

トンネルは 10 m の円形トンネルを想定し、実験においてはその 1/100 の直径 100 mm の円孔とした。

(2) 実験装置

a) 実験土槽および载荷装置

軸対称平面ひずみ条件を再現するため、図-2 のような鋼製土槽を用いる。载荷圧は、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 4 つのゴム製圧力バッグに等圧を供給することにより、模擬地山の外周から与える。

b) トンネルモデル

トンネルは直径 100 mm の円形とし、図-3 に示すように肌落ち防止をかねた厚さ 0.5 mm 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は、トンネル変形にともなって地山材料が流入しないように隣接のプレートと重なるようにする。

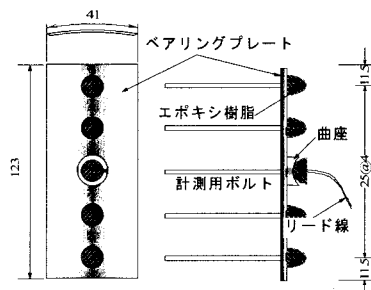


図-3 ボルトおよびベアリングプレートのモデル

c) ロックボルトモデル

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、軸力計測用ボルトとして十字を形成する 4 本のみ (図-2 中の▲印のボルト) ひずみゲージを 1 cm 間隔で 6 枚貼付する。ボルトモデルはすべて断面が一辺 3 mm の正方形断面である。また、アクリルのみのボルト (表面無加工ボルト) 以外に、地山とボルトの摩擦の差による影響を把握するため、アクリル表面にガラスビーズを接着した表面加工ボルトも作成する。

計測用ボルトの頭部とベアリングプレートと接する部分には、プレート表面に曲座を設けてボルトに曲げが作用しないよう処理する。それ以外のボルト頭部とプレートはエポキシ樹脂で接着する (図-3)。

d) 地山モデル

地山材料には、直径 2 mm のガラスビーズを用いる。この材料により、非粘性で自立しない粒状体地山を再現することができるため、ロックボルトの基本的な作用機構を明確にすることができる。また、実験を繰り返す

ことによって生じる材料劣化が極めて少なく、地山作成も容易なことから、この材料は実験の再現性を得やすい。

(3) 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。そこで地山材料を打設する前に所定の打設間隔でボルトを配置しておく。なお、実験槽上下面の摩擦を低減するために、テフロンシート片を敷き詰める。このテフロンシート片は円弧形で、間にシリコンオイルを塗布して2枚を重ねており、互いにオーバーラップさせている。

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等圧を与える。

(4) 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。

(5) 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、トンネル軸方向打設間隔およびボルト表面加工の有無をパラメータとして5ケース実施する。

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。地山モデルの弾性係数および内部摩擦角は、側圧を3種類で三軸圧縮試験を実施し、その平均値として求めた。地山-ボルト間の物性は、本実験に先立って実施されたボルト引抜き実験の結果から得た値である。

4. 実験結果および考察

(1) 荷重に伴うロックボルト軸力の発現機構

図-4(a)から(e)は、荷重に伴うボルトに作用する軸力分布の変化を各実験ケースについて示している。これらの図から各ケースの共通な挙動として次の3点があげられる。

- 1) 荷重圧の小さい段階からボルト軸力の増加がみられる。
- 2) ボルト頭部あるいはその近傍で軸力が最大となる。

表-1 実験ケース

実験ケース	ボルト打設間隔		表面加工の有無	ボルト長 (cm)
	軸方向 (cm)	円周方向 (deg.)		
064515A _N	1.5		—	
064525A _N	2.5		—	
064525A _K		45	○	6.0
064540A _N	4.0		—	
064540A _K			○	

表-2 地山・ロックボルトの諸元

	材料	ガラスビーズ
	単位体積重量 ()	15 N/mm ³
地山モデル	弾性係数 (E_r)	43 MPa
	粘着力 (c_r)	0 kPa
	内部摩擦角 (ϕ_r)	25 deg.
ロックボルトモデル	材料	アクリル
	弾性係数 (E_b)	3,800 MPa
地山-ボルト間	粘着力 (c_f)	0 kPa
	摩擦角 (ϕ_f^N) 無加工	8.5 deg.
	摩擦角 (ϕ_f^K) 加工	17 deg.

3) 荷重圧増加にしたがって軸力も増加する。

ボルト軸方向打設間隔の違いによってその軸力にどのような差異が現れるかを、同図(a)、(b)および(d)の表面無加工ボルトで比較する。打設間隔が密なほど軸力の値が大きいが、最も密な(a)においては頭部軸力が最大値とはならず、地山奥側で最大値を呈す上に凸の分布となっている。また、(a)の最大荷重圧 200kPa 時の頭部軸力は、(b)の頭部軸力の値とほぼ同じで 20N 程度である。ただし、(a)を除いていずれも頭部軸力が最大値となっていることから、ベアリングプレートが機能してトンネル壁面に支保内圧をもたらしていることが推察される。

打設間隔の最も疎なケース(d)において、荷重圧を増しても軸力の増大がそれほど認められない。なお、後述するように、このケースでは荷重初期からトンネル変形が急激に進行し、最大荷重圧 80kPa を超えると崩壊して計測不能となっている。

表面無加工および加工ボルトとの違いで比較すると、いずれの打設間隔でも加工ボルトの軸力値が大幅に増大していることがわかる。さらに、無加工では崩壊してしまつた(d)においても、加工したボルトを使用することによって崩壊を抑止できるだけでなく、軸力の値が大幅に増加し、また、頭部軸力が最大となる下に凸の軸力分布となっている。表面無加工と加工ボルトでは、地山-ボルト間の摩擦角が倍半分であるが、最大軸力とを比較してもそれ以上の軸力増加が認められていることは興味

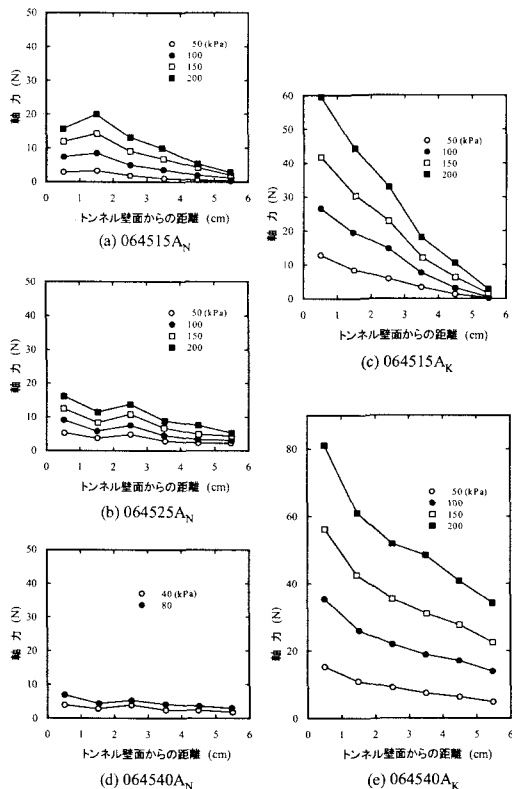


図4 載荷に伴うロックボルト軸力分布の変化

深い。

このように、ベアリングプレートが設置されている場合のロックボルトの挙動は、ベアリングプレートの存在を考慮しない従来モデルとは明らかに異なる。

(2) 載荷圧とトンネル壁面変位との関係

図-5(a)から(e)は、載荷に伴うトンネル壁面変位を各実験ケースについて示している。これらの図から各ケースの共通な挙動として次の2点があげられる。

- 1) 載荷圧の小さい段階から変位が生じる。
- 2) 載荷にともなって変位は増加するが、崩壊しないケースでは上に凸の増加となる。

ボルト打設間隔（軸方向）の違いによって壁面変位にどのような差異が現れるかを、同図(a)，(b)および(d)の表面無加工ボルトで比較する。打設間隔が密なほど変位抑制効果が大きく、その効果は最も密な(a)において顕著である。また、載荷圧が増すにしたがい変位増加も頭打ちとなり（上に凸）、抑制効果が発揮されているものと考えられる。ただし、打設間隔の最も疎なケース(d)においては、載荷圧を増していくと急激に変位が増大し、前述の通り 80kPa を超えると崩壊してしまう。この間の変位増加モードは上に凸とはならずほぼ直線の増加モードとなっていることから、ロックボルトの効果は

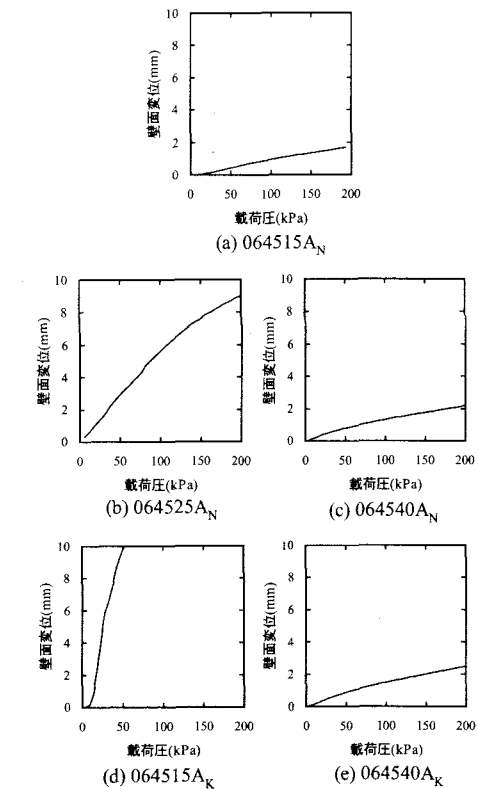


図5 載荷に伴うトンネル壁面変位の変化

ほとんど発揮されていないと考えられる。

表面無加工および加工ボルトとの違いで比較すると、いずれの打設間隔でも加工ボルトの変位抑制効果が顕著に発揮されていることがわかる。さらに、無加工では崩壊してしまった(d)においても、加工したボルトを使用することによって、(a)や(c)とほぼ同じような挙動となっている。

こうした挙動は、前項の軸力分布の結果と関連づけるとうまく説明できる。すなわち、地山とボルトとの摩擦が十分に発揮され、トンネルの変位が増加するにしたがってボルトの軸力が十分に発現すれば、トンネル壁面変位を抑制させることができる。このとき、ベアリングプレートによって頭部軸力の反力をトンネル壁面にみかけの支保内圧として作用させている。

5. ロックボルトによる支保内圧効果を考慮した簡易設計法

(1) トンネル力学モデルの考え方

非粘着性の粒状体地山では、トンネル掘削後即座にかつ広範囲に塑性領域が進展するものと考えられる。

そこでボルト全長がすべて塑性域に含まれるものとして簡便化を図る。また、地山の剛性に比して剛なボルト

を挿入することを想定し、ボルト自身の伸縮については考慮しない。

(2) 塑性リングの安定に必要な支保内圧

軸対称のロックボルトを含む地山モデルを塑性リングとし、円周方向については打設間隔 φ を、軸方向については打設間隔 S_z をひとつの要素として切り出す。この要素を上から見た図-6において、幅 dr のスリットのロックボルト軸方向のつり合いを考えると、次式が得られる。

$$S_z r \int_{-\varphi/2}^{\varphi/2} \sigma_r \cos \theta d\theta - S_z (r + dr) \int_{-\varphi/2}^{\varphi/2} (\sigma_r + d\sigma_r) \cos \theta d\theta + S_z dr 2\sigma_t \sin \frac{\varphi}{2} + \beta l_b \tau_f dr = 0 \quad (1)$$

ここで、 l_b はボルト周長、 β は付着度係数 ($0 \leq \beta \leq 1$) である。付着度係数 β は地山とボルトの付着の程度を表すものとする。この係数の値が1であれば極限状態を表し、地山-ボルト間の付着が最大限に発揮された状態を意味する。0に近づくほど付着の程度が弱くなり、0ではボルトが打設されていない無支保状態と等価である。非粘着性粒状体地山において、地山内半径方向応力および接線方向応力をそれぞれ σ_r および σ_t とすれば、地山がクーロンの降伏条件にしたがうとの仮定により、

$$\sigma_t = \zeta \sigma_r \quad (2)$$

ここで、 $\zeta = (1 + \sin \phi_r) / (1 - \sin \phi_r)$ 、 ϕ_r は地山の内部摩擦角である。また、地山-ボルト間の付着抵抗は摩擦角をとして次式で規定されるものとする。

$$\tau_f = \sigma_t \tan \phi_f \quad (3)$$

式(2)および(3)を式(1)に代入して整理し、さらに境界条件を適用して微分方程式を解くと、ロックボルトで補強された塑性リングの支保内圧 p_r が次式ようになる。

$$p_r = p_0 (1 + \eta_l)^{1-k\zeta} \quad (4)$$

ここで k は次式(5)で表される。 η_l はボルト長 l をトンネル半径 a で除した無次元量である。

$$k = 1 + \frac{\beta l_b \tan \phi_f}{S_z 2 \sin(\varphi/2)} \quad (5)$$

(3) 地山-ロックボルト間の付着抵抗によって発揮される有効支保内圧

塑性リング形成時に、式(3)で示される摩擦特性がボルト全長にわたって作用しているものと考えれば、この特性をボルト全長にわたって積分することによりトンネル壁面におけるロックボルト頭部軸力 F_b を求めることができる。その結果は次式で示される。

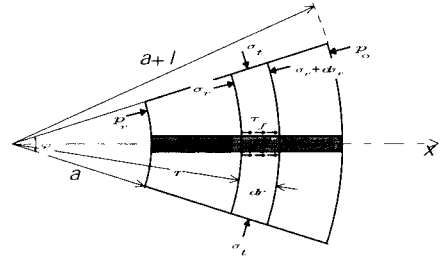


図-6 ボルトを含む地山の力学モデル

$$F_b = \beta l_b \frac{a}{k} p_0 \frac{(1 + \eta_l)^{k\zeta} - 1}{(1 + \eta_l)^{k\zeta - 1}} \tan \phi_f \quad (6)$$

支保内圧に換算するにはボルト1本あたりが負担する面積 $S_z a \varphi$ で除せばよい。これが地山-ボルト間の摩擦特性によって発揮される有効支保内圧 p_b となる。

(4) 試算

式(4)から得られる p_r と式(6)から誘導される p_b の大小関係で、 p_b が p_r より大きい場合はトンネルを安定させるのに必要な支保力がロックボルトの保持力より上回ることになる。この逆の関係ではトンネルは不安定な状態にあると考える。載荷圧200kPa時のこの関係を図示すると図-7 および図-8 のような支保特性曲線が得られる。

図-7 により、軸方向打設間隔が広くなると必要とする付着度係数の値が大きくなることを意味し、また、この載荷圧では、打設間隔が3cm強を超えると付着度係数によらず不安定となることがわかる。一方、図-8 から、地山-ボルト間摩擦係数が15°を超えないとトンネル安定性が得られないことがわかる。

これらの試算は、実験結果をほぼ反映していることから、簡便モデルの妥当性および設計の目安として用いることができると考えられる。

6. おわりに

本論文では、非粘着性粒状体地山トンネルにおけるベアリングプレートに有するロックボルトの作用メカニズムを実験により明らかにし、そのメカニズムを考慮した簡便モデルを構築した。

このモデルにより、トンネル軸方向打設間隔や地山-ボルト間の摩擦特性と付着度係数の関係を求め、実験結果をある程度反映していることがわかった。

模型実験結果ならびに簡便モデルによる理論解析結果から得られた主な結論は以下の通りである。

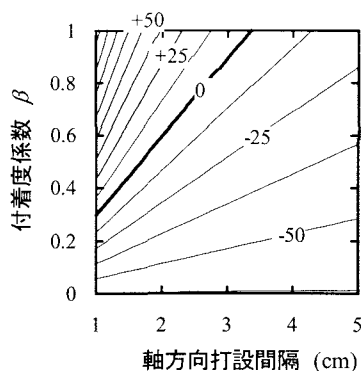


図-7 軸方向打設間隔と付着度係数に関する支保特性曲線

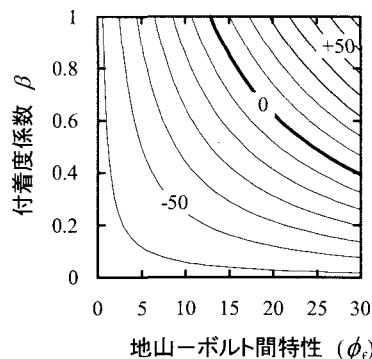


図-8 地山ボルト間摩擦特性と付着度係数に関する支保特性曲線

- (1) ベアリングプレートが有効に機能していれば、ボルト頭部で最大の軸力を呈し、ボルト全長にわたって地山がロックボルトの変位を抑制する方向にせん断応力の作用するアンカー効果をもたらす。
- (2) ロックボルトの軸方向打設間隔が密なほど、また地山-ボルト間摩擦特性が大きいくほどトンネル壁面変位抑制効果に優れている。
- (3) 簡便モデルにより、ボルト軸方向打設間隔あるいは地山-ボルト間摩擦特性の範囲によって、トンネル安定/不安定を論じることができる。

以上から、この簡便モデルによって、実設計への目安や、実際に計測されたロックボルトの実現象に対するひとつの評価を与えることができる。

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

SIMPLIFIED MODEL FOR TUNNELS IN GRANULAR MATERIALS CONSIDERING THE EFFECT OF SUPPORT PRESSURE DUE TO ROCKBOLTING

Tsuyoshi DOMON, Kyoungwon SEO and Kazuo NISHIMURA

The simplified model for tunnels in granular materials is developed based on perfectly elasto-plastic concepts considering the effect of support pressure due to rockbolting with bearing plate. The model is verified by model tests in which we adopt axisymmetrical tunnel models in granular materials with two parameters; longitudinal bolt spacing and coefficient of the interaction between ground and bolt. The model proposed in this paper could be estimated the optimum bolting pattern or coefficient of ground-bolt interaction. The results of a series of test indicate that: i) the shear stress along the bolt acted as anchor length if the bearing plate set at the tunnel wall; ii) the support effect increased with the decrease of bolt spacing and with increasing the coefficient of the interaction.