

文章编号: 1000-7598-(2007) 增刊-0236-05

管缝式锚杆在拉拔荷载作用下受力分析模型

杨海清, 周小平, 张永兴

(重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

摘 要: 建立了管缝式锚杆在拉拔荷载作用下的受力分析模型, 该模型能够反映锚杆破坏的渐进过程。分析表明, 在拉拔荷载作用下管缝式锚杆在荷载作用点最先发生相对滑移, 且随着荷载的增加滑移段的长度逐渐增加, 直到整根锚杆与围岩发生相对滑移。根据能量守恒原理得到了管缝式锚杆在安装入钻孔后对围岩径向作用力的计算公式。对管缝式锚杆进行了非局部摩擦分析, 得到了基于非局部摩擦模型的管缝式锚杆界面剪应力分布。研究了管缝式锚杆直径对锚杆界面剪应力分布的影响, 同时得到了锚杆最大抗拉拔力与锚杆长度之间的关系。将理论模型预测值与试验结果对比, 验证了理论模型的有效性。

关 键 词: 管缝式锚杆; 剪应力; 最大抗拉拔力; 非局部摩擦模型

中图分类号: TU 454

文献标识码: A

Analytical model for split-set rock bolt under pull-out force

YANG Hai-qing, ZHOU Xiao-ping, ZHANG Yong-xing

(School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, China)

Abstract: A new analytical model for split-set rock bolt under pull-out force has been developed. Research shows that slips may occur first at the loading point under pull-out force when the applied load is large enough. The length of slip segment increases with an increase in the applied load, and finally the length of slip zone arrives at the length of rock bolt. Based on the conservation of energy, formulae of radial forces acting on the surrounding rock mass induced by split-set rock bolt are obtained. On the basis of nonlocal friction model, the distribution of shear stress on the interface of split-set rock bolt is determined. Through the parametric study of an illustrative case, effects of the rock bolt's diameter on the distribution of shear stress is studied, the relationship between the ultimate pull-out strength and rock bolt's length is also obtained. It is shown that the present analytical model is in good agreement with the experiment results.

Key words: split-set rock bolt; shear stress; ultimate pull-out strength; nonlocal friction model

1 引 言

管缝式锚杆 (split-set rock bolt) 是由美国密苏里州的 J. J. Scott 于 1973 年发明的, 这种锚杆具有安装方便、价格低廉和适用于各类岩石等许多优点, 因此, 被广泛应用于采矿工程生产实践。管缝式锚杆是一种全长摩擦型锚杆, 它靠管壁与钻孔壁之间的摩擦力起锚固作用, 从而达到加固围岩的目的^[1]。由于围岩的性质不同, 对锚固力大小的要求也各有差异, 实践中常采用抗拉拔试验检测锚固质量, 因此, 有必要对管缝式锚杆在拉拔力作用下的受力情况进行分析, 从而为工程设计提供理论依据。

目前, 对管缝式锚杆的研究常常注重于锚杆与围岩界面的剪切刚度^[2,3], 而实际中单纯的拉拔试验很难得到交界面的剪切刚度。例如, Farmer 等^[4,5]的研究表明, 在拉拔荷载作用下锚杆与围岩界面未发生相对滑移之前其剪应力呈指数函数形式分布。C. Li 等^[6]建立了全长摩擦型锚杆在拉拔荷载作用下的分析模型。Abramento 等^[7]在拉拔试验的基础上分析了平面复合纤维的支护效果以及纤维与周围介质之间的耦合作用。蔡跃等^[8,9]分析了锚杆拉拔试验中由耦合到破坏的整个过程, 提出了一个计算交界面真实粘结强度的新方法。刘伟平等^[10,11]对岩体灌浆锚杆进行了非局部摩擦分析, 得到了锚杆侧剪应力分

布的积分形式。

本文对管缝式锚杆在拉拔荷载作用下的受力情况进行了分析,建立了管缝式锚杆界面剪应力及最大抗拉拔力分析模型。同时,笔者还对影响管缝式锚杆的力学参数进行拉力分析。分析模型不仅考虑了锚杆和围岩的相互作用,而且考虑了锚杆和围岩的非局部摩擦效应,能够反映锚杆破坏的渐进过程,因此,本文建立的分析模型更加符合实际。

2 径向应力分析

图 1 为管缝式锚杆工作前后的横截面。工作前,管缝式锚杆的外径大于钻孔的直径,当用外力将锚杆压入钻孔后,由于锚杆的弹性对孔壁施加一种径向压力,这种压力使锚杆与孔壁间产生摩擦力,阻止围岩变形。另外,和其他锚杆相比,管缝式锚杆可在平行及垂直于锚杆轴线的方向上同时对岩体施加预应力,因此,锚固效果比较好。

在锚杆轴向取单位宽度,并设围岩与锚杆之间的作用力沿径向均匀分布,如图 2 所示,则均匀分布的径向力 p 在任意截面产生的弯矩为^[12]

$$M(\theta) = \int_{\theta_0}^{\theta} p r_1^2 \sin(\theta - \alpha) d\alpha = p r_1^2 [1 - \cos(\theta - \theta_0)] \quad (1)$$

式中: r_1 为管缝式锚杆安装前的外半径; θ_0 为管缝式锚杆安装前的开缝角。

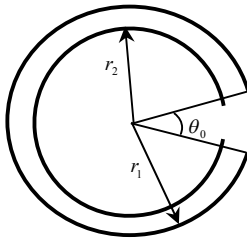


图 1 管缝式锚杆示意图

Fig.1 Sketch of split-set rock bolt

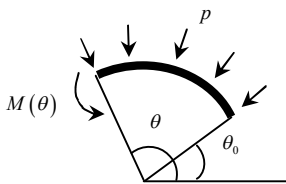


图 2 锚杆单元体受力分析

Fig.2 Analytical model of element in rock bolt

管缝锚杆从未受力状态到被压入岩孔后的平衡状态过程,根据材料力学知识,锚杆在径向力 p

作用下的应变能为

$$U = \int_l \frac{M(x)^2}{2E_b I} ds = \frac{p^2 r_1^5}{2E_b I} \int_{\theta_0}^{2\pi-\theta_0} [1 - \cos(\theta - \theta_0)]^2 d\theta = \frac{p^2 r_1^5}{2E_b I} \left[3(\pi - \theta_0) + 2\sin 2\theta_0 - \frac{\sin 4\theta_0}{4} \right] \quad (2)$$

式中: l 为管缝式锚杆横截面周长; E_b 为锚杆的弹性模量; $I = \frac{t^3}{12}$ 为单位宽度锚杆单元体的截面惯性矩; t 为锚杆壁厚。

径向力 p 在锚杆横向变形时所做的功为

$$W = \frac{1}{2} \int_l p(r_1 - r_2) ds = \frac{1}{2} \int_{\theta_0}^{2\pi-\theta_0} p r_1 (r_1 - r_2) d\theta = p r_1 (r_1 - r_2) (\pi - \theta_0) \quad (3)$$

式中 r_2 为钻孔的半径。

锚杆变形过程能量守恒,即 $W = U$, 可得

$$p = \frac{8E_b I (r_1 - r_2) (\pi - \theta_0)}{r_1^4 [12(\pi - \theta_0) + 8\sin 2\theta_0 - \sin 4\theta_0]} \quad (4)$$

3 轴向应力分析

3.1 拉拔荷载作用下的应力

根据 C. Li 的研究^[6],摩擦型锚杆在拉拔荷载 F 作用下的剪应力分布近似为如图 3 所示。图 3 中,锚杆长为 L ,当 $0 \leq x < x_2$ 时,围岩与锚杆已经发生滑移,此时的界面剪应力近似为最大静摩擦力;当 $x > x_2$ 时,围岩与锚杆共同变形,此时的界面剪应力逐渐衰减。

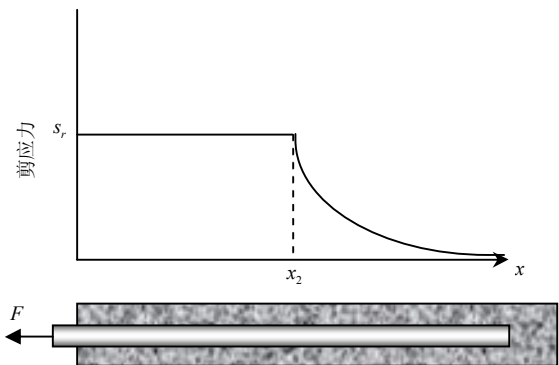


图 3 加载时锚杆剪应力分布图^[6]

Fig.3 Distribution of shear stress along split-set rock bolt under axial tensile loads

(1) 当 $0 \leq x < x_2$ 时,

$$\tau(x) = s_r; \quad \sigma(x) = \sigma_0 - \frac{\pi d_b}{A} s_r x \quad (5)$$

式中: $\sigma_0 = F/A$; $s_r = p\mu$; $d_b = 2r_2$ 为锚杆安装后的外直径; μ 为锚杆与围岩的摩擦系数; F 为锚杆端部作用的集中拉力; A 为管缝式锚杆的截面积。

(2) 当 $x > x_2$ 时,

$$\left. \begin{aligned} \tau(x) &= s_r \exp\left(-2\alpha \frac{x-x_2}{d_b}\right); \\ \sigma(x) &= \frac{2s_r}{\alpha} \exp\left(-2\alpha \frac{x-x_2}{d_b}\right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

根据轴向应力连续, 联立式 (5) 和式 (6) 中第 2 式得:

$$x_2 = \frac{1}{\pi d_b s_r} \left(F - \frac{2As_r}{\alpha} \right) \quad (7)$$

式中, $\alpha^2 = \frac{2G_r}{E_b \ln\left(\frac{d_0}{d_b}\right)}$; $G_r = \frac{E_r}{2(1+\nu_r)}$; d_0 为锚杆的

径向影响范围, 可以近似取为相邻锚杆间距的一半; E_r 和 ν_r 分别为围岩的弹性模量和泊松比。

3.2 非局部摩擦修正模型

一般在处理锚杆与围岩之间的剪应力时都是采用库伦摩擦模型, 事实上在工程中, 某一点的摩擦力不仅与该点的正压力有关, 而且与该点有限邻域内的其他点的应力相关, 即非局部摩擦效应^[13]。

在库伦摩擦模型下, 围岩与锚杆界面剪应力和锚杆径向应力存在如下关系:

$$\tau(x) = p(x)\mu + c \quad (8)$$

$$p(x) = \frac{\tau(x) - c}{\mu} \quad (9)$$

式中: μ 为摩擦系数; c 为锚杆和围岩界面之间的凝聚力。

修正后的非局部摩擦模型为^[11]

$$\left. \begin{aligned} \tau(x) &= S_p(p(x))\mu + c; \\ S_p(p(x)) &= \int_{\Gamma_c} \omega_p(|x-y|) p(y) dy \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

式中: Γ_c 为整个接触面; $\omega_p(|x-y|)$ 为核函数, 一般取 δ 函数, 一种典型的形式为

$$\omega_p(x) = \begin{cases} C_0 \exp\left[\frac{\rho^2}{x^2 - \rho^2}\right], & |x| < \rho \\ 0, & |x| \geq \rho \end{cases} \quad (11)$$

式中: C_0 为常数, 由 $\int_{\Gamma_c} \omega_p(|x-y|) dy = 1$ 确定; ρ 为非局部作用的影响范围。

由于管缝式锚杆的开缝宽度相对于管径较小, 可以近似认为管缝式锚杆与围岩接触面为柱面, 且锚杆侧面的压应力呈轴对称分布, 将面积分改成线积分的形式。

(1) 当 $x \leq x_2$ 时,

$$\tau(x) = s_r \quad (12)$$

(2) 当 $x_2 \leq x \leq x_2 + \rho$ 时,

$$S(p(x)) = \int_{x_2}^{x+\rho} C_0 \exp\left[\frac{\rho^2}{(x-y)^2 - \rho^2}\right] \cdot \frac{1}{\mu} \left[s_r \exp\left(-2\alpha \frac{y-x_2}{d_b}\right) - c \right] dy \quad (13)$$

$$C_0 = \left\{ \int_{x_2}^{x+\rho} \exp\left[\frac{\rho^2}{(x-y)^2 - \rho^2}\right] dy \right\}^{-1} \quad (14)$$

(3) 当 $x_2 + \rho \leq x < (L - \rho)$ 时,

$$S(p(x)) = \frac{1}{\mu} \left[s_r \exp\left(-2\alpha \frac{x-x_2}{d_b}\right) - c \right] \quad (15)$$

(4) 当 $x > (L - \rho)$ 时,

$$S(p(x)) = \int_{x-\rho}^L C_0 \exp\left[\frac{\rho^2}{(x-y)^2 - \rho^2}\right] \cdot \frac{1}{\mu} \left[s_r \exp\left(-2\alpha \frac{y-x_2}{d_b}\right) - c \right] dy \quad (16)$$

$$C_0 = \left\{ \int_{x-\rho}^L \exp\left[\frac{\rho^2}{(x-y)^2 - \rho^2}\right] dy \right\}^{-1} \quad (17)$$

式(13)~(17)中的积分难以得到解析解, 可以根据文献[11]的方法得到数值解。

根据锚杆轴向力的平衡得

$$F = \left[\frac{(2\pi - \theta_0) r_1}{r_2} \right] r_2 \int_0^L \tau(x) dx \quad (18)$$

由式 (7) 可知, x_2 随着拉拔力 F 的增大而逐渐增大至锚杆长 L 。当 $x_2 = L$ 时, 即为锚杆的最大抗拉拔力。将 $x_2 = L$ 代入式 (18) 就可得到管缝式锚杆的抗拉拔力。

4 算例与分析

表 1 为管缝式锚杆理论计算值与试验结果对

比,现场实测结果来自于文献[14]。通过对比分析表明,本文的理论预测值与试验结果较吻合。

表1 管缝式锚杆理论预测值与试验结果对比

Table 1 Comparison of the theoretical and experimental values of the split-set rock bolt

锚杆有效长度/cm	壁厚/mm	开缝宽度/mm	非局部摩擦影响范围 ρ /m	锚杆与围岩摩擦系数	锚杆直径/cm	钻孔直径/cm	抗拉拔力实测值/kN	抗拉拔力计算值/kN	相对误差/%
48	2.55	11	0.04	0.47	3.9	3.603	45.552	41.688 6	-8.5
60	2.83	11	0.04	0.47	3.96	3.8	37.011	36.668 8	-0.9
86	2.68	13	0.04	0.47	3.977 7	3.626 5	96.798	95.807 7	-1.0
103	2.5	12	0.04	0.47	3.935 3	3.671 8	72.596	72.379 8	-0.3

以目前采矿工程常用的管缝式锚杆为例,图4为不同荷载作用下锚杆与围岩界面剪应力分布,计算参数 $r_1 = 22.5$ mm, $r_2 = 20$ mm, $\theta_0 = 0.55$, $t = 3$ mm, $E_b = 210$ GPa, $\mu = 0.2$, $L = 1.5$ m, $E_r = 4$ GPa, $\nu_r = 0.25$, $d_0 = 0.4$ m, $\rho = 0.04$ m。从图4可以看出,随着拉拔力增大,破坏段长度也增大。另外,由于考虑了非局部摩擦效应的影响,在未破坏段剪应力分布曲线出现了一小段弯曲。

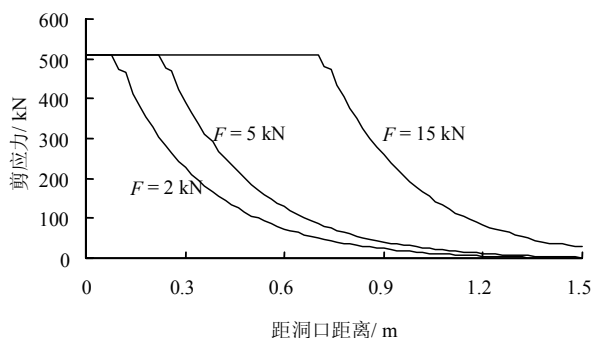


图4 锚杆与围岩界面轴向剪应力分布图

Fig.4 Distribution of shear stress on the interface of rock bolt and rock mass

图5为锚杆最大抗拉拔力与锚杆半径的关系,计算参数为: $\theta_0 = 0.55$, $t = 3$ mm, $E_b = 210$ GPa, $\mu = 0.2$, $L = 1.5$ m, $E_r = 4$ GPa, $\nu_r = 0.25$, $d_0 = 0.4$ m, $\rho = 0.04$ m, $x_2 = 1.5$ m。由图5中可知,锚杆半径 r_1 与与钻孔半径 r_2 差值越大,锚杆的最大抗拉拔力越大,但是 r_1 与 r_2 差值越大,将导致施工越困难。同时,图5也表明随着锚杆半径的增加,锚杆最大抗拉拔力先增加后减少,因此,选用较大直径的锚杆并不一定能提高抗拉拔力。

图6为锚杆最大抗拉拔力与锚杆长度之间的关系,计算参数为: $r_1 = 22.5$ mm, $r_2 = 20$ mm, $\theta_0 = 0.55$, $t = 3$ mm, $E_b = 210$ GPa, $E_r = 4$ GPa, $\nu_r = 0.25$, $d_0 = 0.4$ m, $\rho = 0.04$ m。从图6中可看出,锚杆最大抗拉拔力随锚杆长度的增加而增

加。

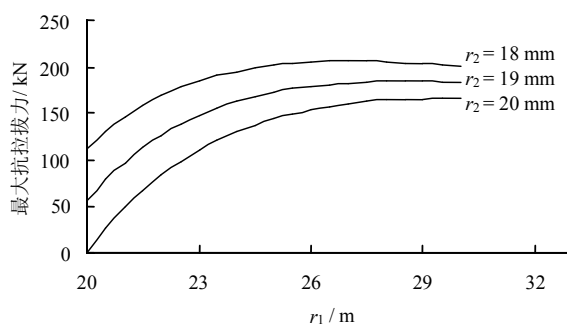


图5 锚杆最大抗拉拔力与锚杆半径的关系

Fig.5 Relationship between the ultimate pull-out strength and rock bolt's diameter

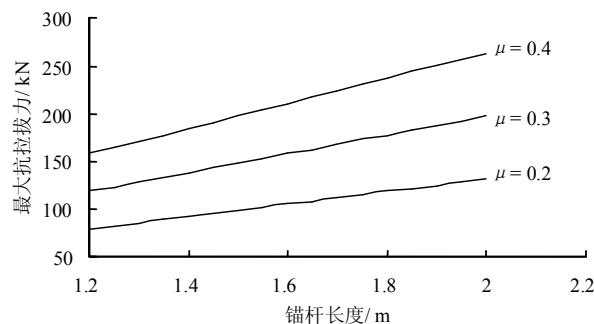


图6 锚杆最大抗拉拔力与锚杆长度的关系

Fig.6 Relationship between the ultimate pull-out strength and rock bolt's length

5 结 论

(1) 本文建立的分析模型可以计算管缝式锚杆在拉拔荷载作用下渐进破坏过程的界面剪应力以及最大抗拉拔力;

(2) 本文的分析模型考虑了管缝式锚杆与围岩非局部摩擦效应的影响,更加符合实际;

(3) 通过参数研究表明,增加管缝式锚杆的直径并不一定能够提高锚杆的抗拉拔力。实际中,如果锚杆直径取的太大还要导致材料的浪费。

参 考 文 献

- [1] Davis R L. Split-set rock bolt analysis[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1979, 16(1): 1—10.
- [2] Makoto Obata, Michio Inoue, Yoshiaki Goto. The failure mechanism and the pull-out strength of a bond-type anchor near a free edge[J]. **Mechanics of Materials**, 1998, 28 (1-4): 113—122.
- [3] 孔宪宾, 余跃心, 李炜, 等. 土—锚杆相互作用机理的研究[J]. **工程力学**, 2000, 17(3): 80—86.
KONG Xian-bin, SHE Yue-xin, LI Wei, et al. The mechanism study of soil-anchor interaction[J]. **Engineering Mechanics**, 2000, 17(3): 80—86.
- [4] Farmer I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, 1975, 12(3): 347—351.
- [5] 应志民, 张洁, 尚岳全. 锚杆荷载-位移曲线的指数函数模型研究[J]. **岩土力学**, 2005, 26(8): 1 331—1 334.
YING Zhi-min, ZHANG Jie, SHANG Yue-quan. Exponential model for simulating load-displacement curve of anchor rod[J]. **Rock and Soil Mechanics**. 2005, 26(8): 1 331—1 334.
- [6] C.Li, B. Stillborg. Analytical models for rock bolts[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 1999, 36(8): 1 013—1 029.
- [7] Abramento M, Whittle J A. Analysis of pull-out tests for planar reinforcements in soil[J]. **Journal of Geotechnical Engineering**, 1995, 121(6): 476—485.
- [8] 蔡跃, 蒋宇静, 江崎哲郎. 杆状支护系统的耦合模型及应用[J]. **岩石力学与工程学报**, 2003, 22(6): 1 024—1 028.
CAI Yue, JIANG Yu-jing, Esaki Tesuro. Coupling model of bolt reinforcement system and application[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2003, 22 (6): 1 024—1 028.
- [9] Yue Cai, Tetsturo Esaki, Yujing Jiang. A rock bolt and rock mass interaction model[J]. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, 2004, 41(7): 1 055—1 067.
- [10] 刘伟平, 扶名福, 罗小艳. 岩体灌浆锚杆的非局部摩擦分析[J]. **力学季刊**, 2005, 26(2): 280—285.
LIU Wei-ping, FU Ming-fu, Luo Xiao-yan. Nonlocal friction analysis of grouting bolt in rock[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 2005, 26(2): 280—285.
- [11] 扶名福, 郭良, 陈桂尧. 非局部摩擦在塑性加工中的应用[J]. **力学季刊**, 2001, 22(1): 112—116.
FU Ming-fu, GUO Liang, CHEN Gui-yao. An application of nonlocal friction in plastic working problems[J]. **Chinese Quarterly of Mechanics**, 2001, 22(1): 112—116.
- [12] 张仕铮, 朱辉. 对“管缝式锚杆锚固力计算”一文的讨论[J]. **有色金属(矿山部分)**, 1984, 36(6): 56—57.
ZHANG Shi-zheng, ZHU Hui. A discussion on the paper “calculation for anchor force of split-set rock bolt” [J]. **Nonferrous Metals(Mining)**, 1984, 36(6): 56—57.
- [13] Oden J T, Pire E. B. Nonlocal and nonlinear friction laws and variational principles for contact problems in elasticity[J]. **Journal of Applied Mechanics ASME**, 1983, 50(3): 67—76.
- [14] 顾裕瑗. 管缝式锚杆锚固力计算[J]. **有色金属(矿山部分)**. 1984, 36(2): 38—41.
GU Yu-yuan Calculation for anchor force of split-set rock bolt[J]. **Nonferrous Metals(Mining)**. 1984, 36(2): 38—41.