

张拉荷载下砂浆锚固岩石锚杆的力学分析

曾华明¹, 李 祺², 岳向红²

(1. 厦门路桥投资总公司, 福建 厦门 361009; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所, 湖北 武汉 430071)

摘要: 砂浆锚固岩石锚杆在张拉荷载下的轴向应力和剪应力分布非常复杂, 为了研究这一问题已经进行了大量的试验, 根据这些试验得到的应力分布曲线和相关结论, 用比较简单的数学表达式对锚杆交界面上的复杂的剪应力分布情况进行理论描述。在交界面已经破坏的部分, 剪应力近似为 0, 随着锚杆埋深的增加剪应力由 0 线性增加到其抗剪强度, 然后再呈指数形式衰减到 0。根据上述数学描述进行实例计算, 计算得到的轴向应力和剪应力分布曲线与实测应力分布曲线基本吻合, 表明用数学表达对锚杆交界面上的剪应力分布情况进行比较准确的描述是切实可行的。

关键词: 岩石力学; 锚杆; 张拉荷载; 应力

中图分类号: TU 45

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2006)增 2 - 3982 - 05

ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOR OF FULLY GROUTED ROCK BOLT UNDER TENSILE LOAD

ZENG Huaming¹, LI Qi², YUE Xianghong²

(1. Road and Bridge Construction Investment Corporation of Xiamen, Xiamen, Fujian 361009, China;

2. Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan, Hubei 430071, China)

Abstract: The distribution of the axial stress and shear stress along fully grouted rock bolt under tensile load is very complex. Many experiments have been done for this purpose. Based on the conclusions and the distribution of the stress gained by experiments, the shear stress distribution of fully grouted rock bolt can be described theoretically by some mathematical expressions. The shear stress is zero in some zone where decoupling appeared. The magnitude of the shear stress linearly increases from 0 to the peak shear strength at the interface which has no decoupling. And then the shear stress decreases exponentially to 0 with increasing bolt embedded length. An illustrative example is introduced. The calculated stress curve of the bolt is consistent with experiment conclusion. It reveals that the distribution of the axial stress and shear stress along a full grouted rock bolt under tensile load can be described by this method.

Key words: rock mechanics; bolt; tensile load; stress

1 引 言

岩土锚固技术已在边坡、基坑、矿井、隧道、地下工程等工程建设中得到了日益广泛的应用。采用锚杆锚固技术, 能充分调用和提高岩土体的自身

强度和自承能力, 确保施工的安全和工程稳定, 并能节约工程造价, 加快施工速度, 具有显著的经济效益和社会效益^[1~4]。

自 20 世纪 70 年代以来, 通过现场监测、室内试验和数值模型, 许多研究工作者对锚杆的受力特性进行了研究。在研究全长黏结式岩石锚杆方面,

收稿日期: 2006 - 06 - 01; **修回日期:** 2006 - 07 - 21

作者简介: 曾华明(1966 -), 男, 1988 年毕业于鹭江大学工业与民用建筑专业, 现任工程师, 主要从事路桥方面的研究工作。E-mail: rbzgb@126.com

T. J. Freeman^[5]进行了开创性的工作,通过对锚杆受荷过程及沿着锚杆应力分布的观测,提出了中性点、锚固长度和拉拔长度的概念。在中性点,锚杆界面剪应力为 0,而锚杆轴力为最大值。所谓拉拔长度是指从锚杆外端到中性点的锚杆长度,锚固长度指从中性点到锚杆里端的锚杆长度。拉拔长度上的剪应力给锚杆施加了拉荷载,把锚杆向外拉伸,而锚固长度上的剪应力把锚杆锚固于岩体中。

拉拔试验作为常用的检测手段正被广泛的应用于测定锚杆的锚固力,但是全长黏结式锚杆在正常工作状态下和张拉荷载下的受力状况是不同的,而且不同类型的锚杆在张拉荷载下的应力分布也是不同的。

本文以全长砂浆锚固岩石锚杆为例,对其在张拉荷载下的受力状况进行了理论分析,根据这些试验得到的应力分布曲线和相关结论,用比较简单的数学表达式对锚杆交界面上的复杂的剪应力分布情况进行了理论描述,并且在此基础上进行了实例验证。

2 张拉荷载下的岩石锚杆

拉拔试验检测方法是一种传统的锚杆锚固质量检测方法,即通过拉力计(液压千斤顶)或者扭力扳手对锚杆施加张拉荷载直到达到设计要求或锚杆松动为止。进行拉拔试验时,将液压千斤顶放在托板和螺母之间,拧紧螺母,施加一定的预应力,然后用手动液压泵加压,同时记录液压表和位移计上的对应读数,当压力或者位移读数达到预定值时,或者当压力计读数下降而位移计读数迅速增大时,停止加压,测试后,根据整理出的锚杆的位移-荷载曲线,对锚杆的受力状况和锚固质量进行分析。

迄今为止,在各类型的岩石中进行了大量的拉拔试验。其中,在研究张拉荷载作用下锚杆的力学行为方面 I. W. Farmer^[6]作了基础性工作,认为在较小张拉荷载作用下,锚杆的轴应力和交界面剪应力从荷载点到锚杆里端以指数形式衰减。然而,对比拉拔试验与现场观测所得到的锚杆轴向应力值与交界面剪应力值可以发现,锚杆外端的轴向应力完全不同于拉拔试验中该部分的轴应力分布,靠近锚杆里端锚杆断面上的轴应力的分布则相似于拉拔试验中该部分的应力分布^[7~10]。

现场试验表明,对一般较完整的岩层中锚杆进行拉拔时,一般来说,裂缝将出现在锚杆-锚固剂

交界面,或在锚固剂中,在本文中,认为破坏发生在锚杆和锚固剂交界面。交界面的抗剪强度由三部分组成:化学胶结力、摩擦力、机械咬合作用。当交界面发生不一致变形时,交界面将首先失去化学胶结力,接着是摩擦力和机械咬合作用^[11]。

由图 1, 2 可知,当施加的张拉荷载非常小时,如曲线 a 所示,交界面上的剪应力较小,没有出现裂缝,锚杆、砂浆、围岩变形协调一致。

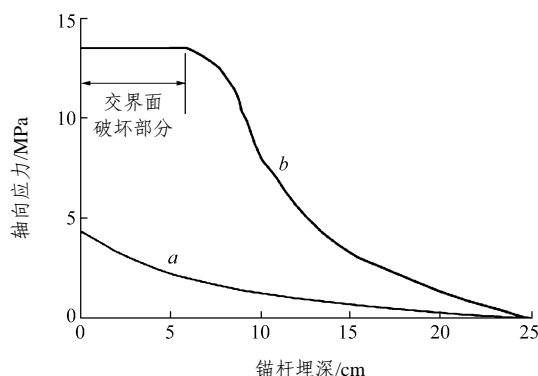


图 1 全长砂浆锚固岩石锚杆在张拉荷载下的轴向应力分布^[6]

Fig.1 Distribution of the axial stress along a fully grouted rock bolt under tensile load^[6]

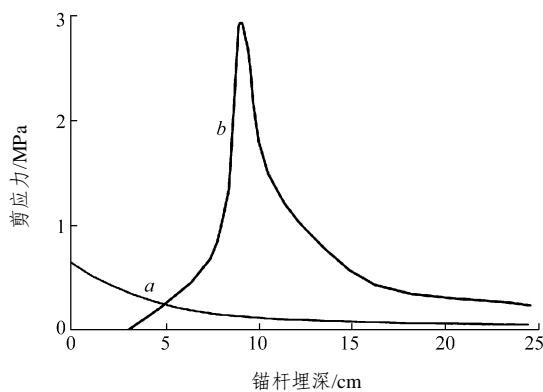


图 2 全长砂浆锚固岩石锚杆在张拉荷载下锚杆剪应力分布^[12]

Fig.2 Distribution of the shear stress along a fully grouted rock bolt under tensile load^[12]

曲线 b 表明当施加荷载达到某一级时,交界面出现裂缝,当荷载进一步增大时,进一步的破坏开始,破坏面朝锚杆里端移动,破坏面处的剪应力等于其抗剪强度,已经破坏的交界面的抗剪强度部分失去,甚至完全失去,没有破坏的交界面的剪应力随着距离的增加逐步减小。

从上面的分析可知,当张拉荷载较小时,锚杆、

砂浆和周围的围岩是一个整体，仅仅只是锚杆顶部的砂浆在发挥作用；但是当张拉荷载增大到某一级时，锚杆顶部的交界面上的剪应力超过其抗剪强度，出现裂缝，已经出现裂缝的区域，砂浆的锚固作用几乎完全丧失，其剪应力近似为 0，裂缝前沿处的交界面，其剪应力随着锚杆埋深的增加由 0 逐渐增加到其抗剪强度，然后又随着锚杆埋深的继续增加呈指数形式逐渐衰减。

对于全长砂浆锚固岩石锚杆，可以认为交界面上的剪应力^[6]以以下形式衰减：

$$\tau_b(x) = \frac{\alpha}{2} \sigma_{b0} e^{-2\alpha \frac{x}{d_b}} \quad (1)$$

其中，

$$\alpha = \sqrt{\frac{2G_r G_g}{E_b \left[G_r \ln\left(\frac{d_g}{d_b}\right) + G_g \ln\left(\frac{d_0}{d_g}\right) \right]}} \quad (2)$$

$$G_r = \frac{E_r}{2(1 + \gamma_r)} \quad (3)$$

$$G_g = \frac{E_g}{2(1 + \gamma_g)} \quad (4)$$

式中： σ_{b0} 为加载点锚杆的轴向应力即锚杆轴向应力的最大值， E_b 为锚杆的弹性模量， E_r 为岩石的弹性模量， E_g 为锚固介质砂浆的弹性模量， γ_r 为岩石的泊松比， γ_g 为砂浆的泊松比， d_b 为锚杆的杆体直径， d_g 为锚杆的钻孔直径， d_0 为锚杆所影响的环形区域的半径。

当对全长砂浆锚固岩石锚杆施加轴向张拉荷载时，可以通过对锚杆某一单元的研究建立起锚杆界面剪应力和轴向应力之间的关系，如图 3 所示。

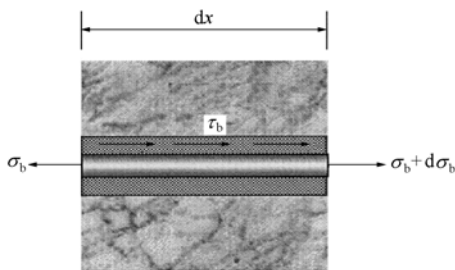


图 3 锚杆单元受力示意图^[10]

Fig.3 Stress components in a small section of a bolt^[10]

由受力平衡条件可知：

$$Ad\sigma_b = -\tau_b \pi d_b dx \quad (5)$$

即

$$\tau_b = -\frac{A}{\pi d_b} \frac{d\sigma_b}{dx} \quad (6)$$

式中： A 为锚杆截面积。

锚杆的轴向应力为

$$\sigma_b(x) = \sigma_{b0} - \frac{\pi d_b}{A} \int_0^x \tau_b(x) dx = \sigma_{b0} e^{-2\alpha \frac{x}{d_b}} \quad (7)$$

$$\sigma_b(x) = \frac{2}{\alpha} \tau_b(x) \quad (8)$$

3 岩石锚杆的应力分布模型

基于以上对全长砂浆锚固岩石锚杆在张拉荷载下的力学分析，可以近似假定锚杆破坏面上的剪应力分布如图 4 所示。

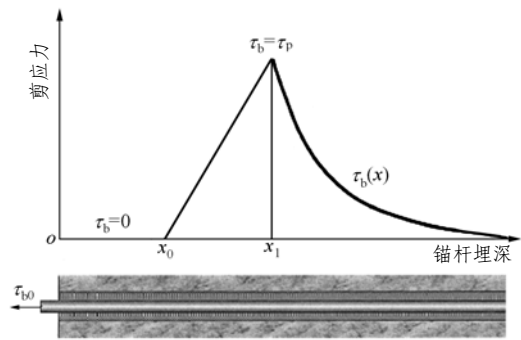


图 4 较大张拉荷载下锚杆剪应力分布示意图

Fig.4 Distribution of shear stress along a fully grouted rock bolt under high tensile load

在这个模型中，锚杆在接近荷载施加点的地方已经完全破坏，锚杆交界面上的剪应力近似为 0，从距离荷载施加点的某一距离 x_0 开始，锚杆交接面部分发生破坏，但仍然有一定的残余抗剪强度，残余抗剪强度将从 0 线性增加到 τ_p 。超过 x_1 交接面的变形将变得协调一致，而且剪应力将随着距离的增加呈指数衰减。

锚杆不同部分的应力可以表述如下：

(1) $0 < x < x_0$ ，锚杆交接面是完全破裂，交接面处剪应力为 0，锚杆的轴向应力为常数：

$$x_0 = \frac{\sigma_{b0} d_b}{2\tau_p} \quad (9)$$

$$\tau_b(x) = 0 \quad (10)$$

$$\sigma_b(x) = \sigma_{b0} \quad (11)$$

(2) $x_0 < x < x_1$, 交接面部分破坏, 残余剪应力强度线性增加到峰值强度, 剪应力和轴向应力为

$$\tau_b(x) = \tau_p \frac{x - x_0}{x_1 - x_0} \quad (12)$$

$$[\sigma_{b0} - \sigma_b(x)] \frac{1}{4} \pi d_b^2 = \int_{x_0}^x \tau_b(x) dx \pi d_b \quad (13)$$

$$\sigma_b(x) = \sigma_{b0} - \frac{2(x - x_0)^2}{x_1 - x_0} \frac{\tau_p}{d_b} \quad (14)$$

(3) $x > x_1$, 交接面变形协调一致, 而且没有发生破坏, 根据式(1), (8), 剪应力和轴向应力朝着锚杆里端的方向呈指数衰减:

由式(1)得

$$\tau_b(x) = \tau_p e^{-2\alpha \frac{x-x_1}{d_b}} \quad (15)$$

由式(8)得

$$\sigma_b(x) = \frac{2\tau_p}{\alpha} e^{-2\alpha \frac{x-x_1}{d_b}} \quad (16)$$

由式(16)得

$$\sigma_b(x_1) = \frac{2\tau_p}{\alpha} \quad (17)$$

由式(14)得

$$\sigma_b(x_1) = \sigma_{b0} - 2(x_1 - x_0) \frac{\tau_p}{d_b} \quad (18)$$

由式(17)和(18)得

$$x_1 = x_0 + \frac{\sigma_{b0} d_b}{2\tau_p} - \frac{d_b}{\alpha} \quad (19)$$

所施加的拉拔荷载等于锚杆交接面所有剪应力之和, 即

$$P = \pi d_b \int_0^L \tau_b(x) dx =$$

$$\pi d_b \left[\int_{x_0}^{x_1} \tau_b(x) dx + \int_{x_1}^L \tau_b(x) dx \right] =$$

$$\pi d_b \left[\frac{1}{2} \tau_p (x_1 - x_0) + \frac{d_b}{2\alpha} \tau_p - \frac{d_b}{2\alpha} \tau_p e^{-\frac{2\alpha(L-x_1)}{d_b}} \right] \quad (20)$$

4 锚杆受力分析

作为算例, 假设锚杆杆体、砂浆和岩体的弹性模量分别为 $E_b = 210 \text{ GPa}$, $E_g = 30 \text{ GPa}$, $E_r = 45 \text{ GPa}$, 围岩和砂浆的泊松比为 $\gamma_r = \gamma_g = 0.25$, 锚杆

杆体直径 $d_b = 25 \text{ mm}$, 锚杆钻孔直径 $d_g = 50 \text{ mm}$, 锚杆长度 $L = 1 \text{ m}$ 。

其他参数如下所示: $\tau_p = 10 \text{ MPa}$, $d_0 = 10d_g$, 通过式(4)得 $\alpha = 0.23$ 。当 $P = 100 \text{ kN}$ 时, 通过式(9)和(19)分别算出 $x_0 = 0.32 \text{ m}$, $x_1 = 0.55 \text{ m}$ 。

基于这一模型算得: 在张拉荷载 $P = 100 \text{ kN}$ 时, 交界面中的裂缝已经出现, 裂缝长度 $x_0 = 0.32 \text{ m}$, 裂缝区域内的交界面抗剪强度近似为 0, 从 x_0 到 x_1 , 交界面的剪应力由 0 线性增加到 $\tau_p = 10 \text{ MPa}$ 。从 x_1 开始, 交界面的剪应力随着锚杆的埋深的增加由最大值以指数形式衰减到 0。钢筋和砂浆交界面的剪应力分布曲线如图 5 所示。

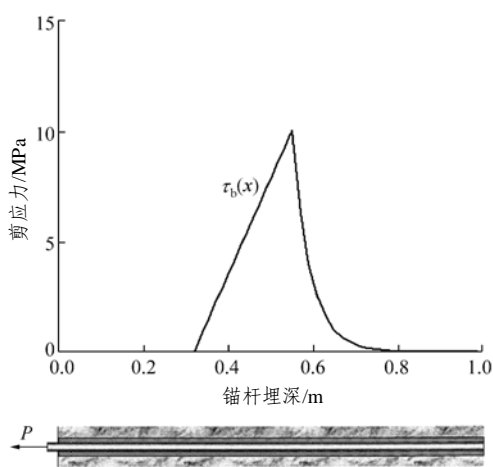


图5 交界面的剪应力分布曲线($P = 100 \text{ kN}$)
Fig.5 Shear stress at the interface under a tensile load of 100 kN

在 $0 < x < x_0$ 区间上, 由于交界面抗剪强度近似为 0, 故钢筋轴力保持不变 $P = 100 \text{ kN}$, 从 x_0 开始, 由于交界面剪应力的存在, 使得钢筋轴力逐渐减小, 随着锚杆埋深的增加, 钢筋轴力逐渐减小到 0。锚杆钢筋的轴向应力分布曲线如图 6 所示。

由图 6 可知, 全长砂浆锚固岩石锚杆在张拉荷载下其应力分布有如下特点:

(1) 全长砂浆锚固岩石锚杆在张拉荷载作用下, 由于表面螺纹的作用, 砂浆处于法向受压状态, 造成锚固体应力分布深度小, 较小的锚固深度即可产生非常大的锚固力。

(2) 当张拉荷载逐渐增大时, 靠近荷载施加点处的交界面将首先出现裂纹, 裂纹逐渐发展成为连通的裂缝, 出现裂缝的区域, 交界面剪应力几乎消失, 并且裂缝会随着荷载的继续增大沿着锚杆继续向深部发展, 从而将施加的荷载不断向锚杆深部传递。

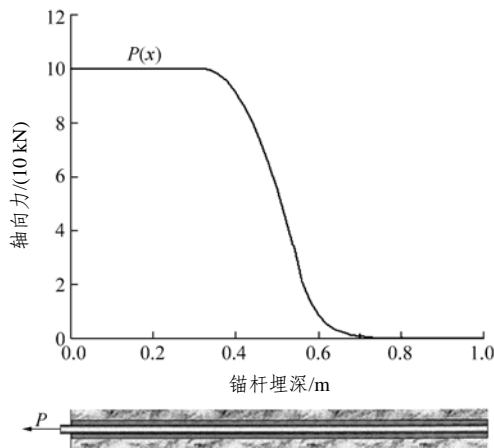


图6 钢筋轴向力分布曲线($P = 100 \text{ kN}$)

Fig.6 Axial force of the steel bar under a tensile load of 100 kN

(3) 交界面上的剪应力沿杆体的分布并不均匀,在不同的荷载下分布范围也不同,一般来说荷载越大,交界面上剪应力分布长度越长。

(4) 一般来说,交界面的剪应力传递深度是有限的。在完整硬质岩层的锚孔中,交界面的剪应力并不会随着上部砂浆的破坏而不断的向底部传递,其具体的传递深度一般会随着工程实际情况的不同而有所不同,关于这一问题还有待进一步的研究。

5 结 语

(1) 根据现场试验得到的全长砂浆锚固岩石锚杆在张拉荷载下的应力分布情况,建立了一个简化的剪应力分布模型,根据该模型对锚杆进行力学分析,计算曲线与实测应力分布情况基本一致,表明所建立的模型符合工程实际。

(2) 全长砂浆锚固岩石锚杆的所能够承受的张拉荷载除了和锚固砂浆的抗剪强度、锚杆杆体的直径和强度有关外,围岩的整体性以及施加荷载的速率也有较大的影响。

(3) 以上计算模型是在一定的假设下推导的,有其适用范围,在实际工程中,还应根据工程的实际情况,充分考虑各方面的因素。

参考文献(References):

[1] 李万喜, 刘建民. 全长黏结式注浆锚杆抗拔力分析[J]. 探矿工程, 2004, (6): 6 - 8.(Li Wanxi, Liu Jianmin. Discussion on wholly grouted anchor pullout resistance[J]. Prospect Engineering, 2004, (6):

6 - 8.(in Chinese))

- [2] 尤春安. 全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(3): 339 - 341.(You Chun'an. Mechanical analysis of wholly grouted anchor[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(3): 339 - 341.(in Chinese))
- [3] 刘明贵, 岳向红. 基于小波神经网络的锚杆锚固质量分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(1): 119 - 125.(Liu Minggui, Yue Xianghong. Analysis of bolt's anchoring quality based on wavelet neural network[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2006, 25(1): 119 - 125.(in Chinese))
- [4] Windsor C R. Rock reinforcement systems[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1997, 34(6): 919 - 951.
- [5] Freeman T J. The behavior of fully-bonded rock bolts in the field: experimental tunnel[J]. Tunnels and Tunneling, 1978, (7): 37 - 40.
- [6] Farmer I W. Stress distribution along a resin grouted rock anchor[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1975, 12(2): 347 - 351.
- [7] 朱焕春, 荣冠, 肖明, 等. 张拉荷载下全长黏结锚杆工作机理试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(3): 379 - 384.(Zhu Huanchun, Rong Guan, Xiao Ming, et al. Testing study on working mechanism of full grouting bolt under tensile load[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(3): 379 - 384.(in Chinese))
- [8] 朱浮声, 郑雨天. 全长黏结式锚杆的加固作用机制分析[J]. 岩石力学与工程学报, 1996, 15(4): 333 - 337.(Zhu Fusheng, Zheng Yutian. Support action analysis of tensioned and grouted bolts[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 1996, 15(4): 333 - 337.(in Chinese))
- [9] 岳向红, 刘明贵, 李祺. 锚杆检测技术研究进展[J]. 土工基础, 2005, 19(3): 83 - 85.(Yue Xianghong, Liu Minggui, Li Qi. Development of bolt's testing technique[J]. Soil Engineering and Foundation, 2005, 19(3): 83 - 85.(in Chinese))
- [10] 姚显春, 李宁, 陈蕴生. 隧洞中全长黏结式锚杆的受力分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(13): 2271 - 2274.(Yao Xianchun, Li Ning, Chen Yunsheng. Theoretical solution for shear stresses on interface of fully grouted bolt in tunnels[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(13): 2271 - 2274.(in Chinese))
- [11] Sun X. Grouted rock bolt used in underground engineering in soft surrounding rock or in highly stressed regions[A]. In: Stephansson O ed. Proceedings of the International Symposium on Rock Bolting[C]. Rotterdam: A. A. Balkema, 1984. 93 - 99.
- [12] Li C, Stillborg B. Analytical models for rock bolts[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 1999, 36(8): 1013 - 1029.