

预应力锚索加固技术的力学行为与群锚效应分析

娄国充, 王树栋, 赵玉成

(石家庄铁道学院 土木工程学院, 河北 石家庄 050043)

摘要: 预应力锚固技术是现代岩土工程加固技术的重要手段。通过对锚索、灌注锚固体和锚孔周围岩土体进行三维弹塑性有限元分析, 研究了锚索、锚固体、岩体的轴向应力分布规律, 以及锚固体与岩体中的剪应力、锚固体的位移和塑性区的变化趋势; 并对群锚效应下锚固体的位移、正应力、剪应力的影响范围进行了分析, 探讨了考虑群锚效应下锚索间距的布置原则, 为在锚固工程中合理施锚和优化布锚提供了依据。

关键词: 岩土力学; 锚索; 岩土锚固体; 群锚效应; 锚索间距

中图分类号: TD 355^{+.9}

文献标识码: A

文章编号: 1000 - 6915(2005)增 1 - 5072 - 04

ANALYSIS OF MECHANICAL BEHAVIOURS AND EFFECTS OF PRESTRESSED ANCHORAGE

LOU Guo-chong, WANG Shu-dong, ZHAO Yu-cheng

(School of Civil Engineering, Shijiazhuang Railway Institute, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Prestressed anchorage technique is an important method to reinforce high rock slope. Based on the numerical simulation analysis by using 3D finite element method, not only the mechanical characteristics of tendon force, shear stress and displacement among anchor cables and grouted body and rock mass but also the anchorage effectiveness are studied. In addition, the regularity of cables pitch is discussed. It is concluded that the structural properties of rock mass is the main factor affecting anchorage stress distribution. The suggested method could be widely used for practical engineering.

Key words: rock and soil mechanics; anchor cable; anchorage grouted body; anchorage effectiveness; cables pitch

1 引言

采用预应力锚固技术加固不稳定岩土边坡, 是近年来岩土工程学科的一个重要分支, 已经得到了广泛的应用和发展^[1~3]。在岩土中, 使用预应力锚固技术, 可以充分发挥岩土的自身承载能力, 调节和提高岩土的自身强度和自稳能力, 增强施工过程中的安全性, 有效控制岩土体的变形, 所以, 具有显著的经济效益与社会效益。但目前对预应力锚固技术的加固机理和加固前后岩土体的力学行为的研究有待深入, 锚固理论和设计方法还有待完善^[4], 因

此, 了解锚固后周边岩土体的力学性状, 对改进预应力锚固设计和完善锚固理论具有重要作用^[5~7]。

本文通过弹塑性三维有限元法对预应力锚索加固岩土体进行了数值模拟, 较清晰地分析了加固后锚索与灌注浆体、灌注浆体和锚孔周围岩土体的力学性状和锚索间距的布置原则, 为理论研究和工程实践提供了参考。

2 计算模型

锚固体由 3 相材料组成, 即钢绞线锚索、水泥砂浆体和锚孔周围岩土体。预应力锚索对岩土体的

收稿日期: 2004 - 10 - 22; **修回日期:** 2004 - 11 - 15

作者简介: 娄国充(1968 -), 男, 硕士, 1991 年毕业于石家庄铁道学院铁道建筑专业, 现任副教授, 主要从事岩土工程方面的教学及研究工作。E-mail: lgch07@126.com。

加固是通过锚索与周围岩土体的粘结作用来实现的。由于粘结力的存在，约束了岩土体的变形，提高了岩土体的稳定性，因此，灌浆锚固体的好坏直接影响着加固效果。为了较好地模拟锚索加固岩土体的实际力学行为，根据锚索的实际工作原理，在计算中作如下模拟^[8, 9]：

(1) 周围岩土体为弹塑性材料，服从 Mohr-Coulomb 屈服准则，屈服函数为

$$F = \frac{1}{3} J_1' \sin \varphi + \sqrt{J_2'} \left(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \varphi \right) - c \cos \varphi = 0 \quad (1)$$

式中： J_1' 为应力偏量的第 1 不变量； J_2' 为应力偏量的第 2 不变量； J_3' 为应力偏量的第 3 不变量； c 、 φ 分别为粘聚力和内摩擦角。且有

$$\theta = \frac{1}{3} \arcsin \left(-\frac{3\sqrt{3}}{2} \frac{J_3'}{\sqrt{J_2'^3}} \right) \quad (2)$$

(2) 锚索单元服从弹性理论，其沿轴向的刚度为

$$k = EA/L \quad (3)$$

式中： E 为锚索的弹性模量， A 为锚索面积， L 为锚索长度。

(3) 设置粘结单元模拟砂浆锚固体，假设其产生滑移破坏，滑移条件采用 Mohr-Coulomb 屈服准则，表示为

$$F = \tau_i - (c - \sigma_n \tan \varphi) = 0 \quad (4)$$

式中： τ_i 为注浆体与周围岩土体接触面间的剪应力， c 为注浆体与周围岩土体接触面间的粘结强度， σ_n 为接触面的正应力。

(4) 模拟锚索预应力为作用于锚索端部周围岩体上分布的外荷载，荷载大小为施加预应力的值，方向与锚索的集中力方向相反。

单根锚索加固范围按 6 根钢绞线的锚索结构体系，锚固长度为 10 m，锚索长度为 9 m，横断面为 5 m×5 m 的正方形。由于界面的对称性，取加固体的 1/4 为计算模型，原点设在锚固深度 10.0 m 处，沿锚索方向向外为 z 轴方向，网格划分如图 1。模型参数选取如表 1，锚索预应力分别为 400，800 和 1 000 kN。

3 计算结果分析

3.1 力学性状分析

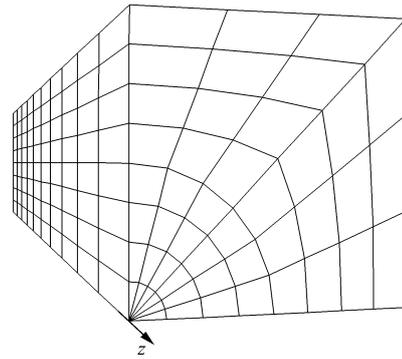


图 1 网格划分

Fig.1 Sketch mesh

表 1 模型参数选取表

Table 1 Mechanical parameters of model

名称	弹性模量 E/MPa	泊松比 μ	粘聚力 c/kPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$
锚索	190	0.3		
浆体	30	0.2	3 500	40
岩体	10	0.2	4 500	65

3.1.1 锚索轴力分布

图 2 为预应力锚索在不同预应力下的轴向应力 σ_z 沿 z 方向的分布曲线。从图中可以看出，锚索的轴向应力沿 z 的负方向呈现衰减趋势且衰减较快，这主要是由于锚索在张拉荷载作用下，通过灌注浆体向周围岩体转移，形成锚固始端轴向拉力较大，并向末端迅速衰减的分布。锚索轴力分布范围随着张拉荷载的加大而增大，但主要分布在距锚固始端 2.0 m 左右，在 4.0 m 以外 σ_z 几乎接近于零。

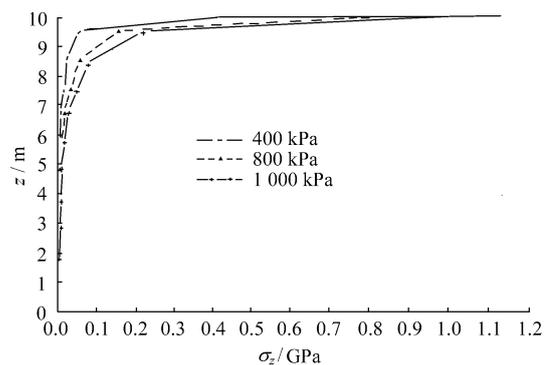


图 2 锚索轴向应力图

Fig.2 Axial stress distribution in anchorage

3.1.2 锚固体与岩土体正应力分布

由计算结果可以看出(如图 3)，灌浆体与岩体的正应力沿径向和轴向都呈衰减趋势。当张拉荷载较小($P = 400 \text{ kN}$)时，正应力主要集中在注浆体之中，

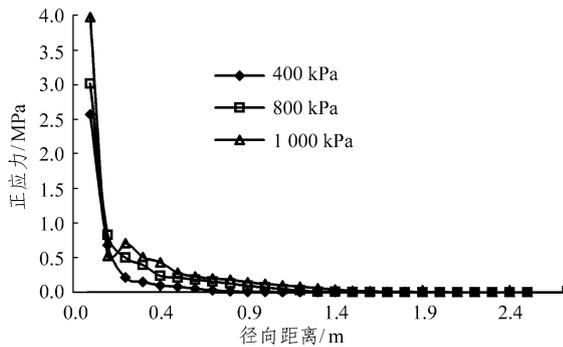


图3 锚固体正应力分布图

Fig.3 Normal stress distribution in anchorage body

随着张拉荷载的加大,正应力逐渐向周围岩体扩散。开始阶段,正应力的过渡阶段相对较平滑;随着张拉荷载的进一步增大($P = 1\ 000\ \text{kN}$),注浆体与岩体单元之间存在一个拉-压-拉的互换区,注浆体的正应力增加相对较大,而周围岩体的正应力增加幅度相对不明显;正应力从注浆体向周围岩体的扩散不再平滑,而是在接触部位出现了突变;注浆体所受正应力比周围岩体大得多,从而验证了锚索的破坏形式一般为注浆体先发生破坏,进而导致锚固体沿孔壁一起滑移抽出。因此,在锚固工程中提高注浆体强度是保证加固质量的关键手段。

3.1.3 注浆体与岩体中的剪应力分布

在外荷载作用下,锚索与注浆体交界面、注浆体内部、注浆体与岩体交界面以及岩土体中产生剪应力。图4为锚固体剪应力分布图,从计算结果可以看出,剪应力主要分布在锚索与注浆体交界面以及注浆体中,最大剪应力 τ_{rz} 出现在锚索与注浆体的交界面处,而周围岩土体中的剪应力要小得多。

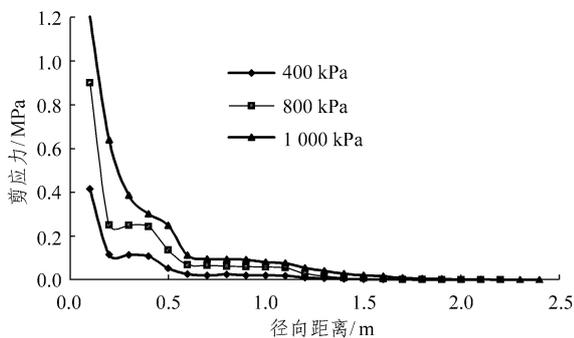


图4 锚固体剪应力分布图

Fig.4 Shear stress distribution in anchorage body

3.2 锚固体变形分析

图5为锚固体在外荷作用下位移分布规律。由图5中可以看出,锚固体中的变形主要发生在锚索

与浆体之间。一般情况下变形受锚索刚体强度控制,随着拉力的增大,变形与拉力成线性增大。在径向方向,变形在锚索中较为集中,而在浆体和周围岩体中相对缓和,其影响范围一般在1.5~3.0 m。

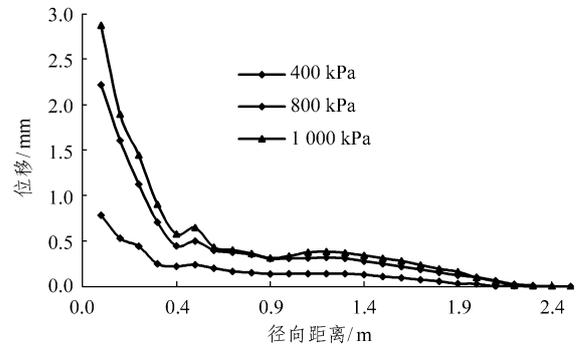


图5 锚固体轴向位移分布图

Fig.5 Displacement distribution in anchorage body

3.3 塑性变形分析

经过计算分析,在荷载作用下,锚固体中的浆体和岩体内产生塑性屈服区。当荷载较小时,塑性屈服区主要在锚索表面形成。随着拉力荷载的加大,塑性变形逐渐发展到浆体和岩体中。而在沿锚固方向,塑性屈服区一般出现在锚固体的锚固始端1.0 m左右的范围内。

4 群锚效应及锚索间距布置原则

通过计算分析可以看出,在锚拉荷载作用下,单根锚索加固的岩土体内所产生的正应力、剪应力、位移和塑性变形存在一定的影响范围,且随着荷载的不同,其影响范围发生变化。当多根锚索共同工作时,相邻锚固体中的正应力、剪应力、位移和塑性变形的影响范围将进行叠加,从而影响整个岩土体内的应力状态。一般地,在相同拉力作用下,位移影响范围较大,正应力影响区域次之,剪应力影响范围最小。由图3~5可以看出,单锚受拉时位移的影响范围约2.25 m,正应力影响范围约为1.75 m,剪应力的影响范围约为1.25 m。因此,多根锚索同时工作时,锚孔间相互完全无影响的最大间距为:位移要求4.5 m,正应力要求1.5~3.5 m,剪应力要求2.5 m。锚索在施加预应力后,在锚固体内出现应力集中现象,外部岩体产生塑性变形。随着外部岩体的塑性变形的出现,应力逐渐向锚固根部转移。锚索锚固力的大小主要取决于浆体与周围岩体交界面的剪应力。一旦剪应力超出交界面的粘结强度,

锚索锚固段与周围岩体发生相对滑移, 锚固效果降低。由此可以看出, 锚索加固岩土体后, 锚体的破坏锥受剪应力控制。因此, 锚索设计时, 其间距无需要求应力和位移为零, 而是需要根据岩土体的自身强度, 以剪应力的影响范围来确定锚索的设置间距, 同时不使塑性区产生重叠。

5 结 语

工程实践表明, 岩土锚固是一种有效的加固措施。但由于岩土介质的复杂性和锚固方式的多样性, 锚固技术至今未形成统一的理论, 锚索的群锚效应问题至今尚未解释清楚。本文通过有限元方法, 对锚固体的力学行为和群锚效应进行了数值分析, 结果表明: (1) 锚固体的轴力、剪应力、位移分布不均匀, 都有集中的现象, 且沿轴向衰减很快, 主要集中在锚固外端; 横向主要集中在锚索和灌浆体中, 并在周围岩体内迅速衰减。因此, 注浆体的强度对锚索的锚固效果起关键作用。(2) 锚固体的破坏锥受剪应力控制, 锚索间距的布置原则应以考虑剪应力为主。

参考文献(References):

- [1] 程良奎. 中国岩土锚固技术的应用与发展[A]. 见: 程良奎, 刘启琛编. 中国岩土锚固技术的应用与发展[C]. 北京: 万国学术出版社, 1996. 1 - 5.(Cheng Liangkui. Application and development of anchoring and grouting technology in China[A]. In: Cheng Liangkui, Liu Qichen ed. Application and Development of Anchoring and Grouting Technology in China[C]. Beijing: International Academic Publisher, 1996. 1 - 5.(in Chinese))
- [2] Fu Bingjun, Qi Junxiu, Xu Shulin. Advances and state of arts of rock anchoring techniques in hydraulic construction in China[A]. In: CSRME ed. Commission on Rock Anchoring and Grouting Technique[C]. Zhongshan: Zhongshan University Publisher, 1999. 85 - 89.
- [3] 张乐文, 汪 稔. 岩土锚固理论研究之现状[J]. 岩土力学, 2002, 23(5): 627 - 631.(Zhang Lewen, Wang Ren. Research on status quo of anchorage theory of rock and soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2002, 23(5): 627 - 631.(in Chinese))
- [4] 张发明, 刘 宁, 赵维炳. 岩质边坡预应力锚固的力学行为及群锚效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增): 1 077 - 1 080.(Zhang Faming, Liu Ning, Zhao Weibing. Mechanical behavior and effects of prestressed anchorage for rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(Supp.): 1 077 - 1 080.(in Chinese))
- [5] 丁秀丽, 盛 谦, 韩 军, 等. 预应力锚索锚固机理的数值模拟试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2002, 21(7): 980 - 988.(Ding Xiuli, Sheng Qian, Han Jun, et al. Numerical simulation and testing study on reinforcement mechanism of prestressed anchorage cable[J]. China Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2002, 21(7): 980 - 988.(in Chinese))
- [6] 张发明, 邵蔚侠. 岩质高边坡预应力锚固问题研究[J]. 河海大学学报(自然科学版), 1999, 27(6): 18 - 26.(Zhang Faming, Shao Weixia. Prestressed anchor cables used in high rock slope[J]. Journal of Hohai University(Natural Science), 1999, 27(6): 18 - 26.(in Chinese))
- [7] Chen S H, Pande G H. Rheological model and finite element analysis of jointed rock masses reinforced by passive fully-grouted bolts[J]. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 1994, 31(3): 273 - 277.
- [8] 何昌荣, 李 彤, 陈 群等. 新型预应力锚拉三维有限元分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(5): 843 - 848.(He Changrong, Li Tong, Chen Qun, et al. 3D FEM analysis on new-style prestressed anchor sheet-pile retaining wall[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(5): 843 - 848.(in Chinese))
- [9] 陈胜宏, 强 晟, 陈尚法. 加锚岩体的三维复合单元模型研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(1): 1 - 8.(Chen Shenghong, Qiang Sheng, Chen Shangfa. Study on the three dimensional composite element model of bolted rock masses[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(1): 1 - 8.(in Chinese))