

地面荷载下端锚型边坡锚杆受力状态演变研究

郝建斌, 汪班桥, 门玉明

(长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 通过室内模型试验,模拟了端锚型边坡锚杆在地面荷载作用下的工作条件,研究了同级荷载作用下土质边坡内各层锚杆的受力特征以及随荷载作用时间的变化规律;并分别比较了不同地面荷载下端锚型锚杆和全长黏结型锚杆的受力差异。结果表明:端锚型土层锚杆在地面荷载作用下,上层锚杆受力最大,底层锚杆受力最小,因此在设计时要考虑对顶层锚杆进行加强设计;端锚型锚杆在较小地面荷载作用下,顶层锚杆和中间锚杆受力最大,不同于全长黏结型锚杆(底层锚杆受力最大,而顶层锚杆受力最小);较大荷载作用下,端锚型锚杆的受力为顶层锚杆受力最大,底层锚杆受力最小,与全长黏结型锚杆类似;在同级荷载作用下,端锚型锚杆轴向应变随荷载作用时间先增大后减小;在地面荷载由小到大的变化过程中,锚杆的受力表现为“小—大—小—大”的变化过程,锚杆受力达到最大的时间和达到稳定的时间均为先增加后减小,所以对于人工边坡,要考虑各级荷载的影响,找到最不利荷载进行合理设计。

关键词: 地面荷载; 土层锚杆; 模型试验; 时间效应

中图分类号: TU476

文献标志码: A

Stress Histories of Partially Grouted Anchors in Slope Under Surface Load

HAO Jianbin, WANG Banqiao, MEN Yuming

(School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, China)

Abstract: Through model tests, an analysis was made of the stress characteristics of partially grouted anchors in soil slope under surface load with a focus on the stress characteristics of each row anchor and its changes with the load time under the loads, the stress histories of anchor with surface load's increase, as well as time of anchors' maximum and stable stress states under different loads. Comparison was done about stress differences between partially grouted anchor and fully grouted anchor. Results show that the strain of top partially grouted is the largest and that of bottom anchors is the lowest under ground loads; the strain of top and middle

partially grouted anchors is larger than the bottom anchors' under lower loads, but the strain of bottom fully grouted anchor is the largest and that of top fully grouted anchor is the lowest; under larger loads, the strain of top grouted anchors are the largest and that of bottom anchors is the lowest, which is similar to the fully grouted anchors; under the same load, the strain of partially grouted anchor increases under a sustained load, and then decreases; with the increase of loads, the peak strain increases to the maximum at first, and then decreases gradually, but increases at last. So, when a structure of anchors is designed to support a man-made soil slope, all level loads should be considered in order to make the slope safe.

Key words: surface load; soil anchor; model test; time-effect

在各种新型的支挡结构中,锚杆(索)以其受力可靠,施工灵活,对岩土体扰动小,作业安全和见效快等突出优点受到了工程界的青睐,在高等级公路边坡和隧道的不良地质加固中发挥了重要作用。与此同时,许多学者对锚杆的受力特性、锚固机理及破坏特征的研究也在一直进行着。其中,对土层锚杆的研究^[1-4]也不乏其数,研究相对较多的是锚杆施工过程中或锚杆试验过程中的应力传递特征。

范秋燕等^[5]通过大型室内模型试验,研究了土质基坑在开挖和预应力锚杆施工过程中土中应力、锚固段应力及基坑壁侧向位移的变化规律。任非凡等^[6]通过数值模拟探讨了多界面复合锚杆荷载传递机制。Desai 等^[7]对土锚系统的相互作用机理进行了研究。许宏发等^[8]通过土层灌浆锚杆的拉拔蠕变试验,建立了锚杆抗拔的流变力学模型,并由此得到了长期抗拔力随时间的变化规律,求出锚杆拉拔的长期抗拔力。景峰等^[9]根据预应力锚索预应力变化过程的特点,将其分为速损阶段、缓损阶段和稳定阶段。

锚杆的受力与土体的变形特征有着直接关系。

收稿日期: 2013-07-01

基金项目: 国家自然科学基金(41102177);中央高校基本科研业务费专项资金(2013G2261010,Chd2011JC102)

第一作者: 郝建斌(1975—),女,副教授,博士后,主要研究方向为岩土体稳定性及安全性评价。E-mail: dedgx28@chd.edu.cn

马萍^[10]认为,由于松散特性是土本身所具有的一种特性,如对其施加荷载作用,那么它的变形将随时间而发展,即发生蠕变变形。由此看来,在土体中受力的锚杆,其受力也将在荷载的作用下随时间发生变化,这一点是不言而喻的。此外,文献[11-14]的研究也证明了这一点。对于预应力锚杆,地层的压缩徐变^[15]、受荷土层蠕变^[16]是造成锚杆预应力随时间衰减的主要原因。对于非预应力锚杆,土层的蠕变同样对锚杆的受力有很大的影响。

而造成土层蠕变的重要因素之一即外荷载。如在公路运营期间,边坡处于不同的地面荷载作用下,此时锚杆的受力与施工过程以及张拉过程中的受力有很大区别。因此,外荷载造成的土体蠕变是不可忽视的。以上的研究均没有考虑外荷载(如地面荷载、车辆荷载)的作用。由于对其受力机理不明了,将不能给设计与施工提供合理的依据,因此,了解公路边坡土层锚杆受力机理对目前锚杆设计水平和减少工程事故及降低工程造价具有指导意义。课题组在文献[17]中对全长黏结型土层锚杆的受力特性进行了详细的探讨,本文将通过模型试验,对不同等级地面荷载作用下端锚型土层锚杆的受力特性进行研究。

1 模型试验概况

试验介质采用现场采集的原状粉质黏土,在模型箱内夯实而成。模型箱由高密板构成,四周用角钢固定,尺寸为:2.0 m(宽)×1.7 m(深)×1.3 m(高)。锚杆采用外径8 mm的铝管模拟,由上至下长度分别为82.77 cm,106.13 cm,87.79 cm。锚杆间距($S_x = S_y$)为0.3 m,各层锚杆长度(锚固段、自由段)分别为:第1层(51.35 cm,31.42 cm)、第2层(50.61 cm,55.52 cm)、第3层(32.58 cm,55.21 cm)。在锚杆的同一轴线上粘贴应变片,滑面两侧应变片距滑面2 cm,锚杆末端和前端应变片间距为5 cm,此外均以10 cm间距布置。模型尺寸见图1,模型制作过程及试验条件同文献[17]。

试验中,在假定滑坡体坡顶放置一厚50 mm垫板,通过反力架用千斤顶于垫板加载,使滑坡体顶部受均布荷载,如图1b所示。首次千斤顶加荷0.5 MPa,之后每次加载幅值为0.5 MPa。加载后每隔5 min进行一次数据采集,直到连续两次采集的数据变化不大时,即认为坡体变形基本稳定,然后再加下一级荷载,直到坡体出现明显破坏,试验加载至7 MPa。图2为试验现场图。

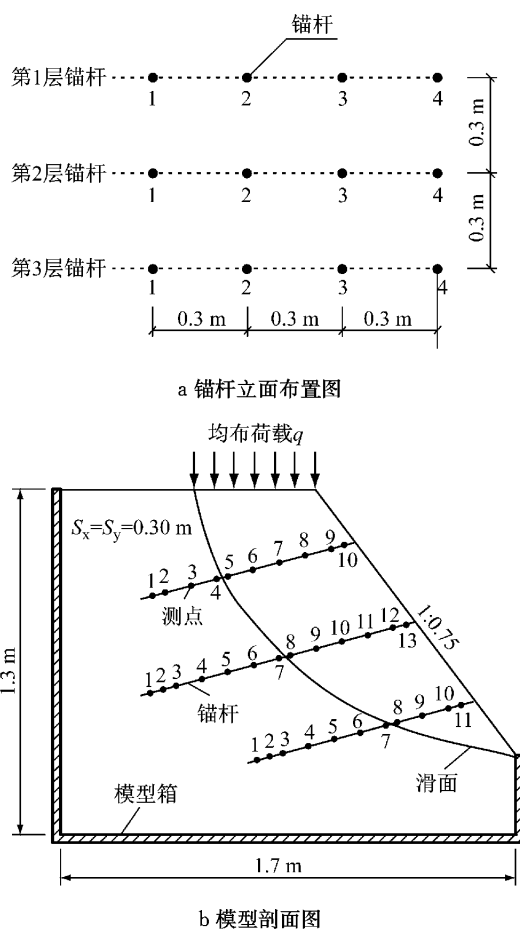


图1 模型简图

Fig.1 Sketch of model



图2 试验现场照片

Fig.2 Photo of model test site

2 试验结果分析

2.1 同级荷载下不同层锚杆的受力特征

图3~9分别为坡顶千斤顶荷载为低荷载(1 MPa)、中级荷载(2,3 MPa)、高荷载(4,5,6,7 MPa)时,第2列锚杆的轴向应变分布图。

2.1.1 低荷载作用

从图3a可以看出,千斤顶压力为1 MPa时,加

载初期荷载主要由顶层锚杆和中间锚杆承担,且自由段荷载水平大于锚固段的荷载水平,说明锚固段开始起作用,但由于受力比较小,锚固段没有全部起作用。受力稳定后,整体荷载水平基本不再发生变化,如图 3c 所示。此时,中间锚杆承受荷载的比例也降低,底层荷载基本不受力。

整体来看,在 1 MPa 荷载下,边坡受到地面荷载时,坡内应力发生了变化,随之锚杆的受力也发生了变化,但变化不是很大。

2.1.2 中级荷载作用

待受力基本稳定后,千斤顶加载到 2 MPa。此时上层锚杆和中间锚杆的受力大小相差不大,但随荷载作用时间增加,锚杆受力发生突变,顶层锚杆自由段的平均应变值从 878×10^{-6} 增大到 $1\,345 \times 10^{-6}$,中层锚杆自由段的平均应变值从 790×10^{-6} 增大到 $1\,305 \times 10^{-6}$,而底层锚杆的受力变化不大(图 4)。3 MPa 时也出现了同样的情况(图 5)。

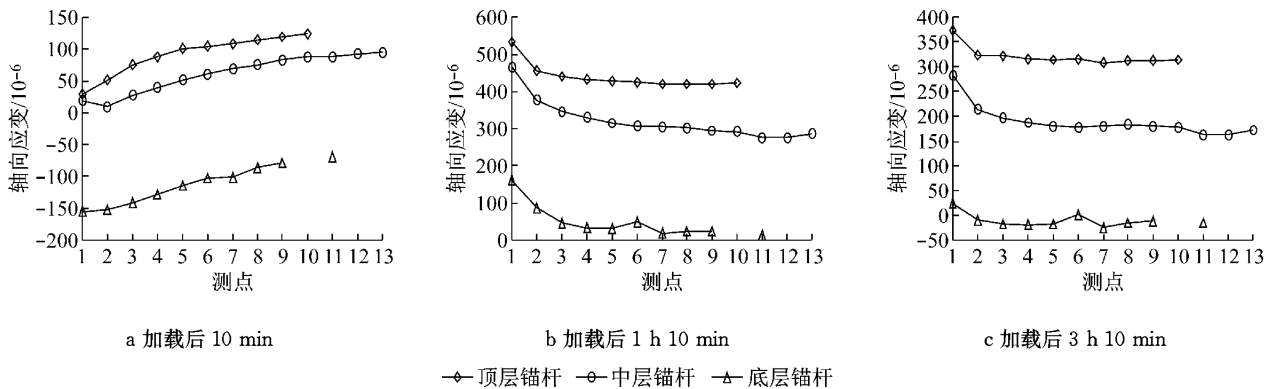


图 3 1 MPa 加载过程中同列锚杆轴向应变分布曲线

Fig.3 Distribution curves of axial strain of anchors on the same column under the load of 1 MPa

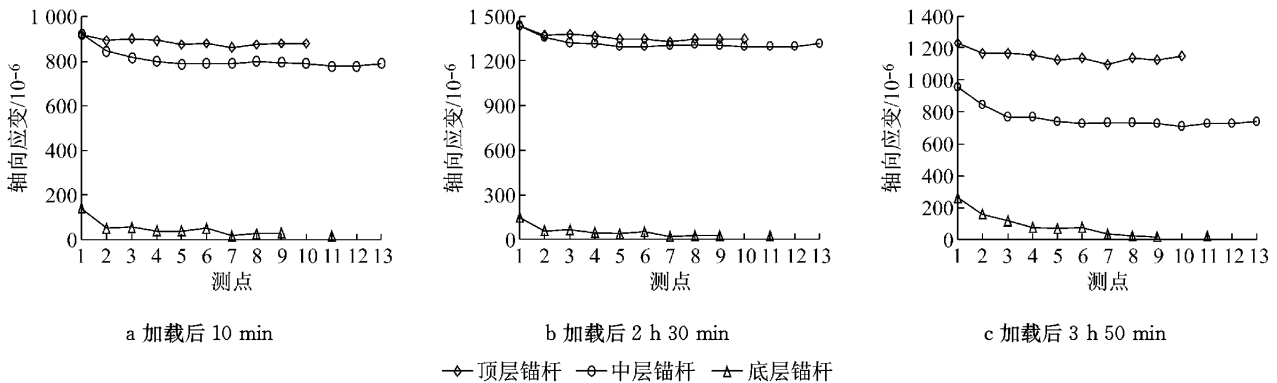


图 4 2 MPa 加载过程中同列锚杆轴向应变分布曲线

Fig.4 Distribution curves of axial strain of anchors on the same column under the load of 2 MPa

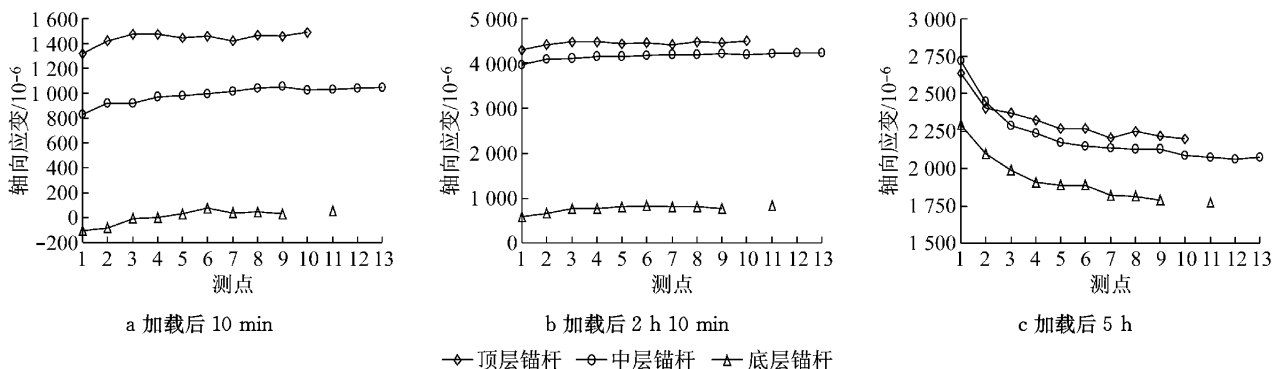


图 5 3 MPa 加载过程中同列锚杆轴向应变分布曲线

Fig.5 Distribution curves of axial strain of anchors on the same column under the load of 3 MPa

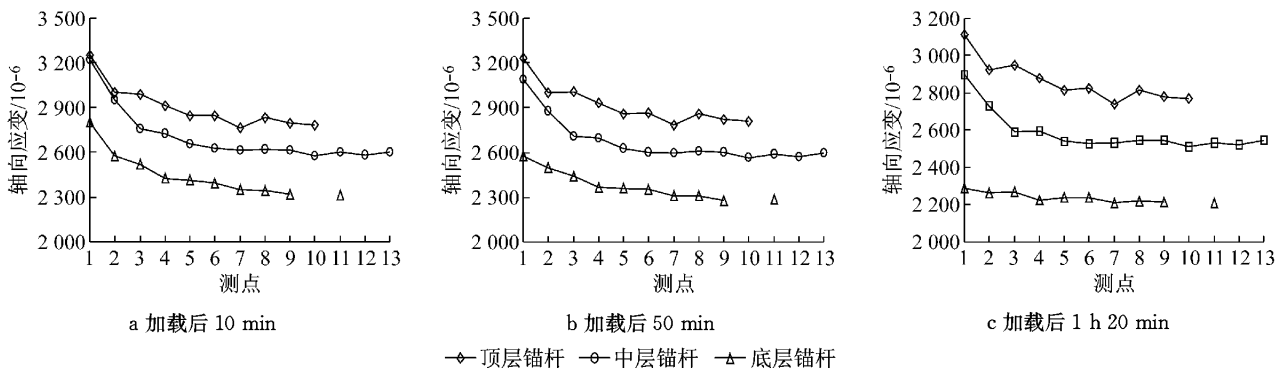


图 6 4 MPa 加载过程中同列锚杆轴向应变分布曲线

Fig.6 Distribution curves of axial strain of anchors on the same column under the load of 4 MPa

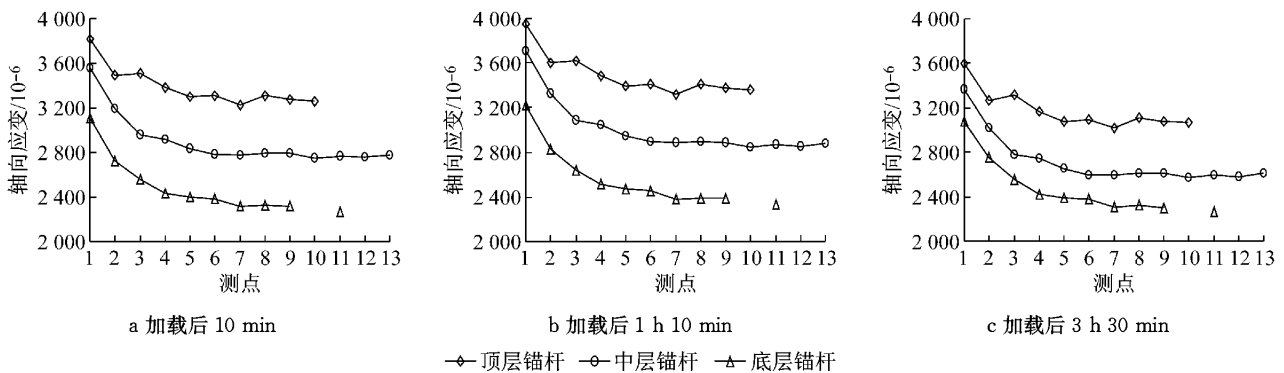


图 7 5 MPa 加载过程中同列锚杆轴向应变分布曲线

Fig.7 Distribution curves of axial strain of anchors on the same column under the load of 5 MPa

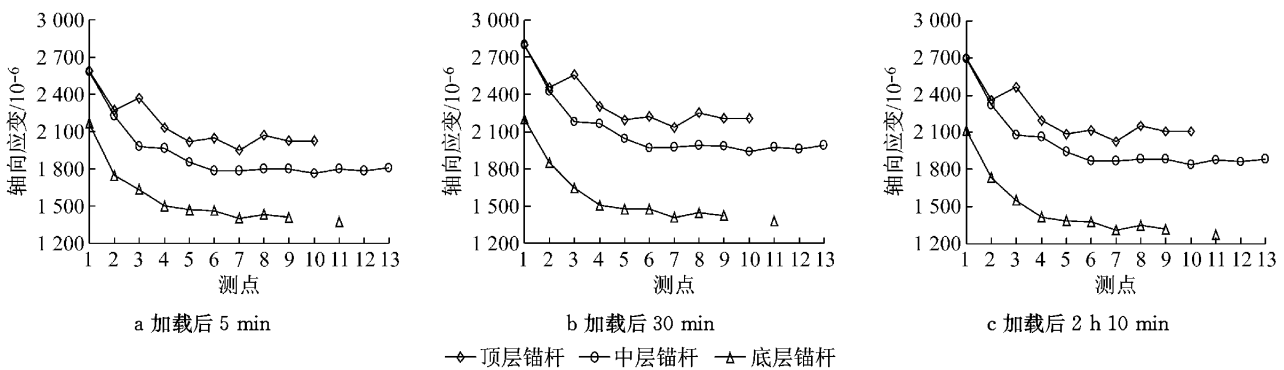


图 8 6 MPa 加载过程中同列锚杆轴向应变分布曲线

Fig.8 Distribution curves of axial strain of anchors on the same column under the load of 6 MPa

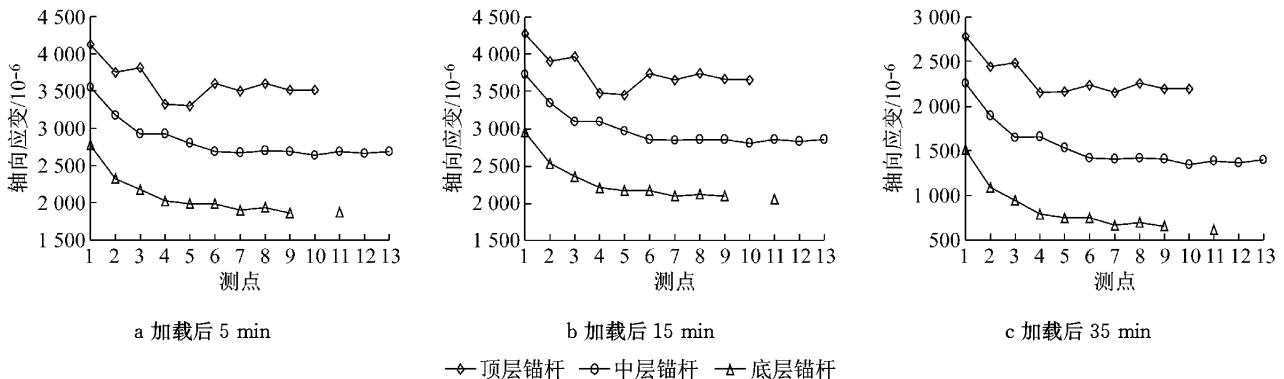


图 9 7 MPa 加载过程中同列锚杆轴向应变分布曲线

Fig.9 Distribution curves of axial strain of anchors on the same column under the load of 7 MPa

可见,在该荷载水平下,边坡土层处于逐渐压实的状态,上部土层已在初始荷载作用下变得相对密实,锚杆与土层界面的相互作用力较大;当外荷载作用一段时间后,土层内荷载不再发生变化时,各层锚杆受力稳定,仍然是上层锚杆和中间锚杆受力最大,但与底层锚杆的受力相差已不再悬殊。

2.1.3 高荷载作用

当千斤顶所加荷载为 4 MPa 时,上层和中层锚杆的应变值变化不大,底层锚杆的应变值呈逐渐下降的趋势,说明荷载已不再向下传递。

荷载在 5~6 MPa 范围内,锚杆的受力均表现为“小—大—小”的变化规律,但整体受力水平出现下降的趋势。如加荷 5 MPa 时,中层锚杆自由段的平均应变值变化为 $2\,773 \times 10^{-6} \rightarrow 2\,874 \times 10^{-6} \rightarrow 2\,596 \times 10^{-6}$; 6 MPa 时,中层锚杆自由段的平均应变值变化为 $1\,800 \times 10^{-6} \rightarrow 1\,973 \times 10^{-6} \rightarrow 1\,872 \times 10^{-6}$ 。

当施加荷载为 7 MPa 时,整体的荷载水平又出现增加的趋势,说明锚杆受力又进入了新的调整阶段,这与试验时所观测到的现象一致。根据观测,当荷载加到 7 MPa 时,坡体已经表现出下滑的迹象,此时坡体的下滑力较大,因此锚杆受到的下滑力也发生了变化。

2.2 锚杆受力的时间效应

试验中发现,在施加荷载的过程中,同级荷载作用下锚杆的轴向应变值均表现出“小—大—小”的变化规律,经过一段时间后基本稳定。但各级荷载下锚杆受力达到最大和稳定的时间有些差异,具体见表 1。

从表 1 可看出,在外部荷载从小到大的变化过程中,各级荷载下锚杆受力达到最大的时间和达到稳定的时间均为先增加后减小。

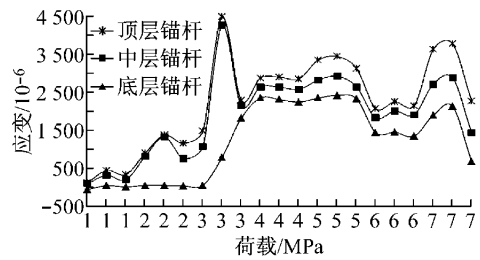
表 1 各级荷载下锚杆轴向应变达到最大和稳定的时间

Tab.1 Time of axial strain of anchors reach stable or maximum value at each loading step

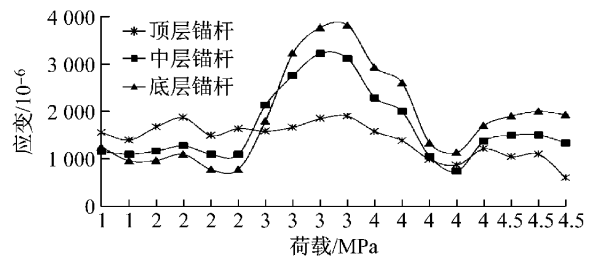
荷载/MPa	锚杆受力达到最大的时间	锚杆受力稳定的时间
1	1 h 10 min	3 h 10 min
2	2 h 30 min	3 h 50 min
3	2 h 07 min	5 h
4	不明显	不明显
5	1 h 10 min	3 h 30 min
6	30 min	2 h 10 min
7	15 min	35 min

在外部荷载由小到大的变化过程中,锚杆的受力表现为“小—大—小—大”的变化过程,以顶层锚杆的第 6 测点、中间锚杆的第 9 测点和底层锚杆的第 9 测点(三点均位于自由段)为例,应变值变化过

程如图 10a 所示。



a 端锚型锚杆



b 全长黏结型锚杆

图 10 各层锚杆轴向应变与荷载及其作用时间的关系

Fig. 10 Axial strain histories of different row anchors with loading

从图 10a 可见,与文献[17]中描述的全长黏结型锚杆的受力特性(图 10b)是类似的:在相同地面荷载作用下,轴向应变呈现出随着时间先增大后减小的趋势;随着荷载的增加,轴向应变峰值也是先增大后减小。在锚杆达到极限荷载前,轴向应变随荷载增大而增大;当达到极限荷载后,轴向应变随荷载增大而减小。但与其不同的是,对于端锚型锚杆,不论荷载多大,顶层锚杆所承受的荷载都最大,底层锚杆最小。而对于全长黏结型锚杆,地面荷载较小时,坡体处于稳定状态,此时顶层锚杆所承受的荷载最大,底层锚杆几乎不起太大作用;当荷载达到极限荷载以后,底层锚杆和中间锚杆起着重要的作用,其中底层锚杆的作用尤为突出,中间锚杆表现为极大的抗下滑能力,而底层锚杆则表现为抗侧滑能力^[17]。

3 结 论

(1) 端锚型边坡锚杆在地面荷载作用下,上层锚杆受力最大,底层锚杆受力最小,因此在设计中应考虑对顶层锚杆进行加强设计。

(2) 在同级地面荷载作用下,端锚型锚杆轴向应变随荷载作用时间先增大后减小。

(3) 地面荷载从小到大的变化过程中,端锚型锚杆受力达到最大的时间和达到稳定的时间均为先增加后减小;锚杆的受力表现为“小—大—小—大”

的变化过程. 设计中要考虑各级荷载的影响, 找到最不利荷载进行合理设计.

(4) 较小地面荷载作用下, 对于端头锚固型锚杆, 顶层锚杆和中间锚杆受力最大; 对于全长黏结型锚杆, 底层锚杆受力最大, 而顶层锚杆受力最小. 较大荷载作用下, 两种锚杆的受力均为顶层锚杆受力最大, 底层锚杆受力最小. 设计中要综合考虑锚杆的类型、荷载的大小, 合理确定锚杆的长度, 才能保证地面荷载作用下边坡的稳定.

参考文献:

- [1] 张志甲. 土层锚杆应力传递及变形分析[J]. 煤炭工程, 2006(5): 78.
ZHANG Zhijia. Reconstruction of chaotic time series for backfill deformation and prediction with neural network[J]. Mining and Metallurgical Engineering, 2006(5): 78.
- [2] 张季如, 唐保付. 锚杆荷载传递机理分析的双曲函数模型[J]. 岩土工程学报, 2002, 24(2): 188.
ZHANG Jiru, TANG Baofu. Hyperbolic function model to analyze load transfer mechanism on bolts[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2002, 24(2): 188.
- [3] 于森. 土层锚杆受力机理的现场试验研究[D]. 南宁: 广西大学, 2005.
YU Miao. Research of experiment about mechanics of soil anchor subjected to force on the spot[D]. Nanning: Guang'xi University, 2005.
- [4] 尤春安. 锚固系统应力传递机理理论及应用研究[D]. 泰安: 山东科技大学, 2004.
YOU Chun'an. Theory and application study on stress-transfer mechanism of anchoring system [D]. Tai'an: Shandong University of Science and Technology, 2004.
- [5] 范秋雁, 陈波, 沈冰. 考虑施工过程的基坑锚杆支护模型试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(12): 1874.
FAN Qiuyan, CHEN Bo, SHEN Bing. Model test research of bolt supporting of foundation pit considering construction process[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(12): 1874.
- [6] 任非凡, 徐超, 谌文武. 多界面复合锚杆荷载传递机制的数值模拟[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2011, 39(12): 1753.
REN Feifan, XU Chao, CHEN Wenwu. Numerical simulation on load transfer mechanism of multi-interface composite rockbolt[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2011, 39(12): 1753.
- [7] Desai S C, Muqtadir A, Scheele F. Interaction analysis of anchor-soil systems [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 1986, 112(5): 537.
- [8] 许宏发, 孙远, 陈应才. 土层锚杆蠕变试验研究[J]. 工程勘察, 2006(9): 6.
XU Hongfa, SUN Yuan, CHEN Yingcai. Study of soil anchor based on creep test[J]. Journal of Geotechnical Investigation & Surveying, 2006(9): 6.
- [9] 景锋, 余美万, 边智华, 等. 预应力锚索预应力损失特征及模型研究[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(5): 52.
JING Feng, YU Meiwan, BIAN Zhihua, et al. Study on prestress loss characteristic and model of prestressed cable[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2007, 24(5): 52.
- [10] 马萍. 土层锚杆锚固机理试验研究[D]. 荆州: 长江大学, 2012.
MA Ping. Research of anchoring mechanism base on soil anchor [D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012.
- [11] Bundred J. On-site measurements of earth pressure and anchor forces for a diaphragm retaining wall[C]// Symposium, Field Instrumentation in Geotechnical Engineering. London: British Geotechnical Society, 1973: 52-69.
- [12] Hanna T N. Foundations in tension-ground anchors[M]. New York: McGraw-Hill Book Co., 1982.
- [13] Kim N K. Performance of tension and compression anchors in weathered soil [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE, 2003, 129(12): 1138.
- [14] Gurinsky A M. Long-term strength of prestressed ground anchors in creep-sensitive soils[C]// Deep Foundations 2002: An International Perspective on Theory, Design, Construction, and Performance. Reston: American Society of Civil Engineers, 2002: 37-52.
- [15] 梁旭辉, 范伟. 岩土锚固的预应力损失[J]. 公路, 2004(8): 114.
LIANG Xuhui, FAN Wei. Prestress loss of ground anchorage [J]. Highway, 2004(8): 114.
- [16] 张晓忠, 张胜民, 李世民. 土层锚杆预应力损失原因分析与补偿对策研究[J]. 四川建筑科学研究, 2009, 35(5): 99.
ZHANG Xiaozhong, ZHANG Shengmin, LI Shimin. Analysis and remedy research on prestress loss of anchors in soil[J]. Sichuan Building Science, 2009, 35(5): 99.
- [17] 郝建斌, 门玉明, 汪班桥. 地面荷载下土层锚杆工作性能试验研究[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(2): 247.
HAO Jianbin, MEN Yuming, WANG Banqiao. Working property of soil anchors under loads on ground surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 247.