

DOI: 10.11779/CJGE201508003

# 滑坡防治格构式预应力锚杆模型试验研究

韩冬冬, 门玉明, 胡兆江

(长安大学地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

**摘 要:** 通过大型物理模型试验, 模拟了滑坡防治格构式预应力锚杆从预应力施加至破坏的过程, 研究了预应力锚杆对滑坡的防治过程、单根锚杆及各锚杆之间的受力变形规律。试验结果表明: 格构式预应力锚杆对滑坡的抗滑作用可分为主动防护阶段和被动防护阶段两个阶段; 在主动防护阶段, 各锚杆受力相同, 而在被动防护阶段, 中下排锚杆受力大于中上排锚杆, 且随着滑坡变形的发展, 这种现象越明显; 在滑坡发展过程中, 锚杆处于弯曲和轴向拉伸组合变形状态, 滑面附近锚固段变形为上侧受拉下侧受压, 自由段则相反, 锚杆轴应变在滑面处最大, 从滑面至锚杆末端逐渐减小, 自由段基本相等; 滑坡中上排锚杆弯曲变形大于中下排, 轴向拉伸小于中下排。

**关键词:** 滑坡防治; 预应力锚杆; 格构式; 模型试验

中图分类号: P642.22

文献标识码: A

文章编号: 1000-4548(2015)08-1375-06

**作者简介:** 韩冬冬(1987-), 男, 博士研究生, 主要从事地质灾害和建筑安全方面的研究工作。E-mail: yatongdongdong@163.com。

## Model test on prestressed anchors with lattice beams in landslide protection

HAN Dong-dong, MEN Yu-ming, HU Zhao-jiang

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

**Abstract:** In order to investigate the protection process of prestressed anchors with lattice beams in landslide protection as well as their force and deformation rules, the process of prestressed anchors from prestressing to failure is simulated through large-scale physical model tests. The study shows that the landslide protection effect of prestressed anchors can be divided into two stages, active and passive protection stages. At the active protection stage, the force of each anchor is equal. But at the passive protection stage, the force of the lower anchors is stronger than that of the upper ones. The phenomenon is more obvious with the development of landslide. The anchors are in a state of bending and tensile stress during the process of landslide development. The deformation of anchored section near the sliding surface is tensioned in the upside and compressed in the bottom side. But for the free section, it is the opposite. The maximum axial strain of the anchors appears at the anchored section near the sliding surface. In the anchorage section, the axial strain decreases gradually from the sliding surface to the end of the anchors while it is equal in the free section. The bending deformation of anchors in the upper rows is greater than that in the middle and lower rows while the axial tension is opposite.

**Key words:** landslide protection; prestressed anchor; lattice beam; model test

## 0 引 言

格构锚固技术是一种将格构梁护坡与锚杆(索)锚固技术相结合的滑坡防治技术, 从 20 世纪 90 年代初使用以来, 因其结构轻便、施工快速、加固效果显著、经济效益明显等优点, 在中国公路、铁路、地质灾害防治等众多领域得到了广泛的应用。经多年应用研究, 岩土界学者对其设计计算方法已取得了一系列成果, 关于格构梁内力计算方法的成果有倒梁法<sup>[1]</sup>和弹性地基梁法<sup>[2-3]</sup>; 关于锚固体的设计计算方法有平均强度法<sup>[4-5]</sup>和最大剪应力法<sup>[6-7]</sup>。上述成果已被广泛地应用于工程实践, 并取得了良好效果, 但对于格

构锚固体系中锚杆受力大小及各锚杆协同作用关系一直没能很好地解决。黄雪峰等<sup>[8]</sup>研究了基坑支护预应力锚杆轴力随时间及空间的分布规律, 探讨了预应力锚杆自由段与锚固段的相互关系, 但未给出各锚杆之间的受力关系; 郝建斌等<sup>[9]</sup>通过室内模型试验, 研究了土层锚杆在地面荷载作用下的工作性能, 认为在地面荷载较小时, 顶层锚杆起主导作用, 而在边坡极限状态下, 中间和底层锚杆起主要的抗滑作用; 林杭等<sup>[10]</sup>

基金项目: 国土资源大调查项目(1212011220145)

收稿日期: 2014-09-11

通过数值模拟得出对于边坡全长注浆锚杆,在边坡岩土体受到外界扰动而劣化时,边坡下部锚杆轴力值最大;目前对于格构式预应力锚杆在滑坡防治中的受力分配规律,还不曾见相关报道,工程设计中大多认为各锚杆从坡顶至坡脚受力相等,即将滑坡推力平均分配予各锚杆,而真实滑坡推力从滑坡后缘至剪出口是逐渐变化的,因此该设计简化实际上是不合理的。

鉴于此,本文通过黄土滑坡模型试验,研究了格构式预应力锚杆对滑坡的防治过程、单根锚杆及各锚杆之间的受力变形规律,得出了一些新的认识,可以为格构锚固体系中锚杆的设计提供一定参考。

## 1 模型试验介绍

### 1.1 试验原理

在模型箱中人工夯填黄土滑坡模型,使其在不加载情况下处于极限平衡状态,采用格构预应力锚杆对该滑坡进行加固,然后在滑体顶面施加竖向荷载使其产生滑动,通过布设于坡脚坡顶的位移计判断坡体的滑移状态,通过安装于锚头的锚杆拉力计及粘贴于锚杆主筋的应变片观测锚杆的受力变形情况,最后总结锚杆的受力变形规律。

### 1.2 试验模型

试验原型采用正方形格构间距为  $3\text{ m} \times 3\text{ m}$  的锚杆,依据试验条件,本次试验采用  $1:2$  的缩尺模型,锚杆间距为  $1.5\text{ m} \times 1.5\text{ m}$ ,试验模型如图 1 所示,剖面如图 2 所示。

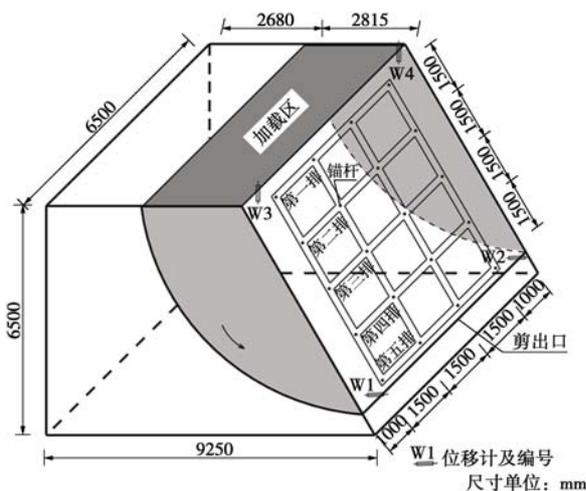


图 1 滑坡模型示意图

Fig. 1 Schematic of landslide model

### 1.3 模型材料

#### (1) 滑床及滑体

试验在自制的大模型箱中进行,为减小边界效应,模型箱两侧铺设塑料薄膜(图 3)。试验滑床及滑体均采用黄土分层夯实填筑,黄土取自西安市南郊某建设

工地,压实系数 0.93。经填土过程中现场取土样进行重度及含水率测试,得到实际夯实后的土体重度为  $20.7\text{ kN/m}^3$ ,含水率为 15%。

#### (2) 滑面

试验采用经典圆弧型滑面,圆弧曲率在以往试验<sup>[11]</sup>的基础上,通过极限平衡法搜索确定,滑面在滑床土填筑完成后依据设计的形状制作,滑带用铺设于滑面的双层塑料薄膜(图 3)模拟<sup>[12]</sup>。以坡体顶部出现微裂缝为滑坡极限平衡状态,此时滑带参数经反算得  $c=5.5\text{ kPa}$ ,  $\varphi=19^\circ$ 。

#### (3) 锚杆及锚头

本次试验共布设 5 排 4 列 20 根锚杆,锚杆采用锚固段注浆、自由段灌砂的拉力型锚杆,锚固段注浆通过砂浆体积和洞口目测控制。1~4 排(从上到下)锚杆锚固段长 3 m、第 5 排锚杆锚固段长 2 m(图 2),锚杆砂浆标号为 M30,锚筋为  $\phi 14$  的 HPB300 钢筋,锚孔直径 120 mm,倾角  $20^\circ$ ,施加预应力 10 kN。锚头采用螺母锁定(图 4)。

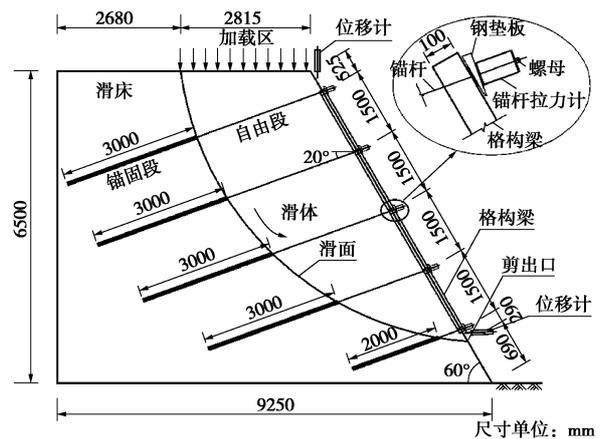


图 2 模型剖面图

Fig. 2 Profile of landslide model



图 3 模型滑面图

Fig. 3 Sliding surface of model

#### (4) 格构梁

格构梁采用正方形截面,其大小为  $100\text{ mm} \times 100$

mm, 主筋采用 4 $\phi$ 6HPB300 钢筋, 箍筋为  $\phi$ 2.4@200 铁丝, 混凝土强度为 C10。格构梁提前在地面预制, 在锚杆浇筑养护 28 d 后, 用吊车吊至坡面安装, 格构梁与坡面缝隙用细砂填充。



图 4 锚头照片

Fig. 4 Photo of anchor head

### (5) 测试系统

滑坡滑移变化通过布设于坡脚 (W1、W2) 及坡顶 (W3、W4) 的位移计实现 (图 1), 锚杆拉力通过安装于各锚头的锚杆拉力计测得, 锚杆变形通过粘贴于锚筋上下表面的应变片测得。应变片型号为 AX120 $\times$ 5AA, 间距在锚固段为 20 cm, 自由段为 40 cm, 应变测试选用 TST3826 静态应变测试分析系统。

### (6) 加载设计

锚杆预应力的施加通过扳手紧固锚头外端的螺母实现, 分两级施加, 每级 5 kN, 共计 10 kN; 滑坡推力的增加通过坡顶人工分级堆加砂袋实现, 每级加载 6 kPa, 每级加载后, 实时测试数据, 待数据基本稳定后施加下一级荷载, 共施加荷载 42 kPa (图 5)。



图 5 加载后的模型照片

Fig. 5 Photo of model after loading

## 2 试验过程

首先, 按设计图纸制作滑坡模型, 滑坡前缘坡面削至剪出口以上 0.5 m 左右时, 坡顶出现裂缝, 表明此时滑坡已达到极限平衡状态, 此时, 对滑坡模型进行临时砂袋压脚支护; 然后按设计要求制作锚杆, 在

锚杆养护完成后, 通过吊车安放预制格构梁; 最后, 连接测试系统, 施加预应力, 撤临时支护, 开始逐级加载测试。

当试验加载至 42 kPa 后, 坡顶最大下沉 66 mm, 坡脚最大位移 72 mm, 1 根锚杆出现破坏, 但滑坡未出现明显失稳迹象; 此时各锚杆最大拉力为 32.5 kN, 已接近锚杆设计承载力, 锚杆在滑面位置的应变片出现破坏现象, 格构梁跨中及节点均出现大量裂缝, 共计 123 条, 表明锚杆及格构梁均已达到承载能力极限状态, 加载结束。

## 3 试验分析

### 3.1 滑坡位移分析

图 6 为本次试验坡脚水平向及坡顶竖直向位移随加载的变化曲线, 从图中可看出, 加载 6 kPa 后, 坡顶有较小位移, 但坡脚无位移, 说明此时滑坡未发生滑移, 坡顶位移为土体压缩固结沉降; 加载 12 kPa 后, 坡脚及坡顶位移均有变化, 说明此时滑坡发生了滑移。因所建滑坡模型在无支撑作用时, 处于极限不稳定状态, 而试验中, 滑坡滑移发生于加载 12 kPa 后, 可判断 12 kPa 之前, 预应力锚杆对滑坡起主动防护作用; 12 kPa 之后, 滑坡滑移随每次加载先增大而后趋于稳定, 可判断锚杆对滑坡起被动防护作用。

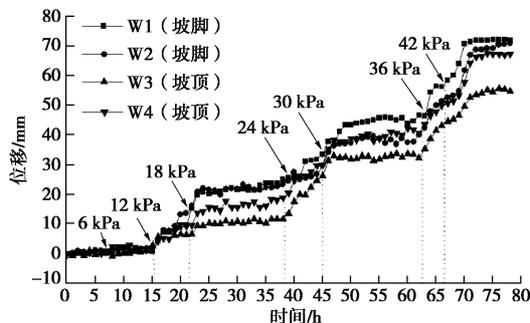


图 6 坡顶及坡脚位移变化曲线

Fig. 6 Curves of displacement at slope top and toe

### 3.2 锚杆受力分析

试验共测得 43 组锚杆拉力值, 图 7 各锚杆拉力随加载的变化曲线 (图中编号 J2-3 表示第二排 (自上而下) 第三列 (面向坡体自左至右) 锚杆, 其余类似)。从图中可以看出, 加载 12 kPa 之前, 各锚杆受力维持不变, 基本等于所施加的预应力 (部分损失); 12 kPa 之后, 随着加载各锚杆拉力开始发生变化, 顶排锚杆拉力减小, 而其余锚杆拉力增大; 加载 42 kPa 后, 锚杆 J5-4 拉力变小, 表明其发生了破坏。

结合上节滑坡位移分析, 可将预应力格构锚杆对滑坡的抗滑作用分为两个阶段: 主动防护阶段和被动防护阶段。在主动防护阶段, 各锚杆拉力相等, 锚杆

预应力抵消了因坡顶加载而增加的滑坡推力；被动防护阶段，各锚杆受力不同，随滑坡沿滑面的滑移，顶排锚杆拉力减小，其余各排锚杆拉力增大。

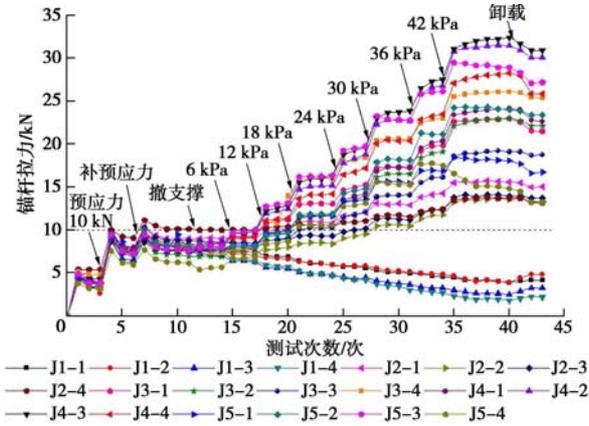


图7 各锚杆拉力随加载变化曲线

Fig. 7 Variation of anchor tension with load

为进一步分析锚杆在不同空间的受力分布规律，取荷载 42 kPa 时各锚杆受力数据，见图 8，从图 8 中可看出，第一、二、四排同排锚杆受力基本相等，第三、五排同排锚杆受力有所差异，可能原因是边界效应和锚杆制作工艺误差影响，但各排锚杆受力明显不同。取各排锚杆每级加载后稳定的拉力均值进行分析，可得各横排锚杆拉力随加载的变化情况，见图 9，10，其中图 9 反映各横排锚杆拉力随时间的变化规律，图 10 反映各横排锚杆拉力的空间分布规律。从图 9 可以看出顶排锚杆拉力随加载减小，其余各排锚杆拉力随加载增大，中下排锚杆拉力增幅较中上排大；从图 10 可以看出，被动防护阶段，锚杆从坡顶至坡底受力不同，即各排锚杆对滑坡的抗滑作用不同，中下排锚杆抗滑作用较大，且随着加载这种现象更明显。取各级荷载作用下各排锚杆拉力均值与所有锚杆拉力均值的比值得表 1，从表 1 中可得出，随着加载顶排锚杆抗滑作用从 100%降至 17%，第四、五排锚杆抗滑作用分别从 100%增至 161%和 126%，可见中下排锚杆在设计时应增大安全储备。

### 3.3 锚杆变形分析

试验共测得 37 组锚杆应变数据。锚杆在拉力  $P$  和弯矩  $M$  联合作用下，其上下表面的应变分别为

$\varepsilon_1 = \varepsilon_p + \varepsilon_M$  和  $\varepsilon_2 = \varepsilon_p - \varepsilon_M$ ，由此可得锚杆的弯曲应变为

$$\varepsilon_M = (\varepsilon_1 - \varepsilon_2) / 2 \quad (1)$$

锚杆的轴应变为

$$\varepsilon_p = (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) / 2 \quad (2)$$

根据式 (1)、(2)，通过所测应变数据可求得锚杆

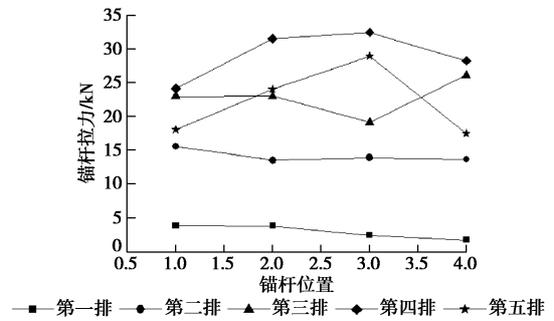


图8 荷载 42 kPa 时各横排锚杆受力图

Fig. 8 Tension of each horizontal anchor at 42 kPa

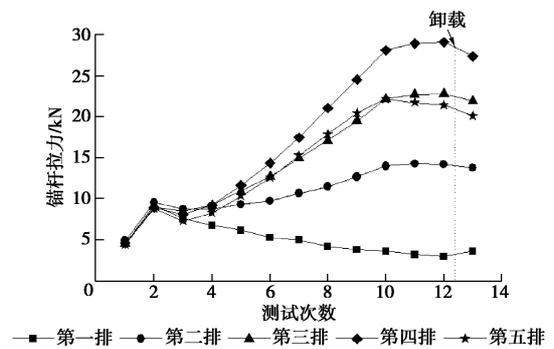


图9 各横排锚杆拉力均值随加载变化曲线

Fig. 9 Average tension of each horizontal anchor with load

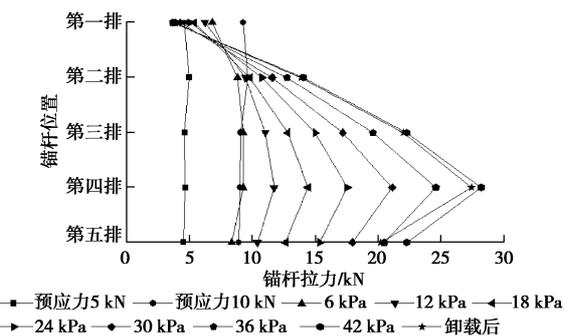


图10 坡顶至坡底锚杆拉力随加载变化图

Fig. 10 Average tension of anchors from top to bottom with load

表 1 各级荷载作用下各排锚杆拉力均值与所有锚杆拉力均值的比值

Table 1 Ratios of average tension of each horizontal anchor to average tension of all anchors under different loading levels

锚杆位置	预应力作用/kN		坡顶荷载作用/kPa						
	5	10	6	12	18	24	30	36a	42
第一排	0.99	1.01	0.96	0.64	0.49	0.40	0.29	0.24	0.17
第二排	1.07	1.05	1.04	0.97	0.89	0.84	0.80	0.78	0.78
第三排	0.99	0.99	1.09	1.13	1.16	1.18	1.19	1.20	1.26
第四排	1.00	0.98	1.09	1.20	1.31	1.38	1.47	1.51	1.61
第五排	0.97	0.97	0.98	1.07	1.15	1.21	1.25	1.26	1.18

沿长度方向的弯曲应变和轴应变。

图 11 为锚杆 J1-2 的弯曲应变随加载的变化曲线, 从图上可以看出, 锚杆弯曲应变在滑面位置±50 cm 范围内变化显著, 并随着加载逐渐增大, 且可看出锚杆钢筋在锚固段为上侧受拉, 在自由段为下侧受拉。

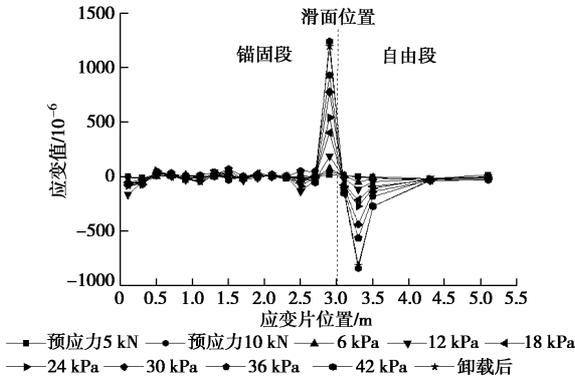


图 11 锚杆 J1-2 弯曲应变随加载的变化曲线

Fig. 11 Bending strain curves of J1-2 anchor with the load

图 12 为锚杆 J3-3 的轴应变随加载的变化曲线, 从图上可看出拉力型锚杆受力不均匀, 轴应变在滑面位置最大, 自滑面至锚固段末端逐渐减小, 且末端应变明显小于滑面处应变; 自由段轴应变基本相等, 大小接近滑面位置应变; 另外, 也可看出锚杆最大轴应变随着加载逐渐增大。

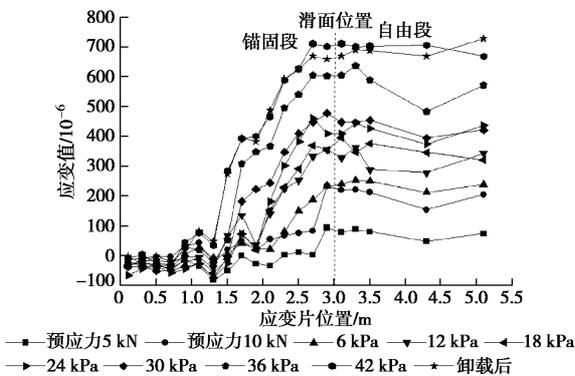


图 12 锚杆 J3-3 轴应变随加载的变化曲线

Fig. 12 Axial strain curves of 3-3 anchor with load

上述分析表明格构式预应力锚杆处于弯曲和轴向拉伸组合变形状态, 因此, 目前规范<sup>[4-5]</sup>中的锚杆设计计算公式, 尚不能反映锚杆弯曲变形、锚杆受力不均匀及锚杆轴力在锚固段向后逐渐衰减的特点。

为了比较分析不同排锚杆变形的规律, 取 42 kPa 时各横排锚杆弯曲应变均值及轴应变均值, 得到图 13, 14。从图 13 可看出坡体中上排锚杆弯曲应变大于中下排锚杆, 说明中上排锚杆发生的弯曲变形大于中下排锚杆; 从图 14 可看出中下排锚杆轴应变大于中上排锚杆轴应变, 说明中下排锚杆轴向拉伸大于中上排, 即中下排锚杆轴力大于中上排, 与锚杆拉力计所测结

果相吻合。

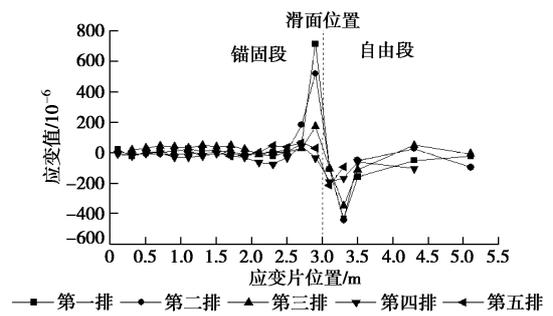


图 13 42 kPa 时坡顶至坡底锚杆的弯曲应变曲线

Fig. 13 Bending strain curves of anchor from top to bottom at 42 kPa

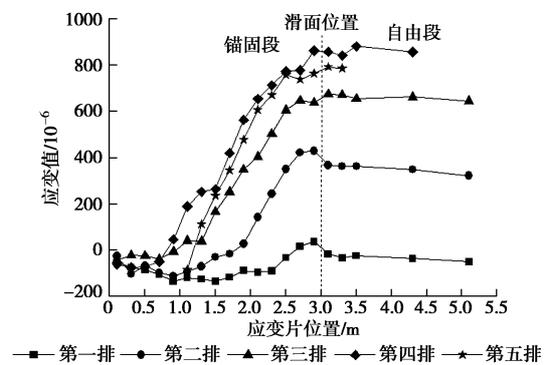


图 14 42 kPa 时坡顶至坡底的锚杆轴应变曲线

Fig. 14 Axial strain curves of anchor from top to bottom at 42 kPa

### 4 结论与建议

通过以上试验结果分析, 对于黄土滑坡防治中的格构式预应力锚杆, 主要得出以下结论及建议:

(1)格构式预应力锚杆对滑坡的抗滑作用分为两个阶段: 主动防护阶段和被动防护阶段, 主动防护阶段, 各锚杆受力相同, 被动防护阶段, 各锚杆受力不同。

(2) 在被动防护阶段, 顶排锚杆抗滑作用较小, 中下排锚杆起主要抗滑作用, 且随着滑坡变形的发展, 这种现象越明显。因此, 建议在设计预应力格构锚固工程时, 各横排锚杆抗滑作用应进行适当修正, 增大底排锚杆的安全储备, 另外对于各横排锚杆的抗滑作用大小, 应通过更多的工程监测数据来统计分析。

(3)格构式预应力拉力型锚杆在抗滑作用过程中处于弯曲和轴向拉伸组合变形状态, 在滑坡发展过程中, 锚杆锚固段在滑面附近的变形为上侧受拉下侧受压, 自由段则相反; 锚杆轴应变在滑面处最大, 从滑面至锚杆末端逐渐减小, 自由段基本相等。

(4) 滑坡中上排锚杆轴应变小于中下排, 但弯曲应变大于中下排, 即中上排锚杆轴力小于中下排, 弯

曲变形大于中下排。

### 参考文献:

- [1] 殷跃平. 滑坡钢筋砼格构防治“倒梁法”内力计算研究[J]. 水文地质工程地质, 2005, 6: 52 - 56. (YIN Yue-ping. Internal force analysis on steel concrete lattice by reverse beam method for landslide control[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2005, 6: 52 - 56. (in Chinese))
- [2] 肖世国, 周德培. 岩石高边坡预应力锚索地梁的一种内力计算方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(2): 250 - 253. (XIAO Shi-guo, ZHOU De-pei. Internal force calculation method of prestressed-cable beam-on-foundation for high rock slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(2): 250 - 253. (in Chinese))
- [3] 唐辉明, 许英姿, 程新生. 滑坡治理工程中钢筋混凝土格构梁设计理论研究[J]. 岩土力学, 2004, 25(11): 1683 - 1687. (TANG Hui-ming, XU Ying-zi, CHENG Xin-sheng. Research on design theory of lattice frame anchor structure in landslide control engineering[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(11): 1683 - 1687. (in Chinese))
- [4] GB50330—2013 建筑边坡工程技术规范[S]. 2013. (GB50330—2013 Technical code for building slope engineering[S]. 2013. (in Chinese))
- [5] DZ/T 0219—2006 滑坡防治工程设计与施工技术规范[S]. 2006. (DZ/T 0219—2006 Specification of design and construction for landslide stabilization[S]. 2006. (in Chinese))
- [6] 肖世国, 周德培. 非全长黏结型锚索锚固段长度的一种确定方法[J]. 岩石力学与工程学报, 2004, 23(9): 1530 - 1534. (XIAO Shi-guo, ZHOU De-pei. Calculation method of length of anchoring segment for partial-cohesive cable[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2004, 23(9): 1530 - 1534. (in Chinese))
- [7] 张友葩, 高永涛, 吴顺川. 预应力锚杆锚固段长度的研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(6): 980 - 986. (ZHANG You-pa, GAO Yong-tao, WU Shun-chuan. Study on bonding length of prestress anchor bar[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(6): 980 - 986. (in Chinese))
- [8] 黄雪峰, 马 龙, 陈帅强, 等. 预应力锚杆内力传递分布规律与时空效应[J]. 岩土工程学报, 2014, 36(8): 1521 - 1525. (HUANG Xue-feng, MA Long, CHEN Shuai-qiang, et al. Distribution characteristics and time-space effects of internal force of prestressed anchor rod[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2014, 36(8): 1521 - 1525. (in Chinese))
- [9] 郝建斌, 门玉明, 汪班桥. 地层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 - 249. (HAO Jian-bin, MEN Yu-ming, WANG Ban-qiao. Working property of soil anchors under loads on ground surface[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(2): 247 - 249. (in Chinese))
- [10] 林 杭, 曹 平. 锚杆长度对边坡稳定性影响的数值分析[J]. 岩土工程学报, 2009, 31(3): 470 - 474. (LIN Hang, CAO Ping. Numerical analysis for effect of bolt length on stability of slopes[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2009, 31(3): 470 - 474. (in Chinese))
- [11] 李寻昌, 门玉明, 张 涛, 等. 锚杆抗滑桩破坏模式的试验研究[J]. 岩土工程学报, 2011, 33(5): 803 - 807. (LI Xun-chang, MEN Yu-ming, ZHANG Tao, et al. Experimental study on failure modes for anti-slide piles with a single anchor[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2011, 33(5): 803 - 807. (in Chinese))
- [12] 刘洪佳, 门玉明, 李寻昌, 等. 采用不同滑面材料的滑坡模型试验研究[J]. 灾害学, 2011, 26(1): 10 - 13. (LIU Hong-jia, MEN Yu-ming, LI Xun-chang, et al. Study on slip material in landslide model tests[J]. Journal of Catastrophology, 2011, 26(1): 10 - 13. (in Chinese))