

# 土质边坡锚杆受力特性模型试验研究

林 聪<sup>1</sup>, 雷学文<sup>1</sup>, 孟庆山<sup>2</sup>, 周容方<sup>1</sup>

(1. 武汉科技大学 城市建设学院, 湖北 武汉 430065; 2. 中国科学院 武汉岩土力学研究所 岩土力学与工程  
国家重点实验室, 湖北 武汉 430071)

**摘要:** 针对滇黔地区的风化玄武岩土质边坡情况, 进行边坡锚杆室内模型试验。分别对单根锚杆的应变分布曲线, 同列锚杆在坡面、滑面及锚固段末端处的应变曲线, 以及坡面渗水前后、不同加载量级的锚杆应变分布曲线, 固定拉拔力下不同锚固长度锚杆的荷载位移情况进行了分析。结果表明, 锚杆应变沿杆长呈中间大、两端小的曲线分布, 而锚杆变形较多集中在坡顶以下的第一排, 且坡脚和坡顶的应变比其他部位要大, 更容易被破坏。加荷初期锚杆应变出现负值, 表明锚杆是以拉应力为主的拉压弯复合构件。

**关键词:** 玄武岩风化土; 模型试验; 锚杆应变; 边坡渗水; 锚杆破坏

中图分类号: TV554.12 文献标志码: A

土层锚杆是近代岩土工程领域的一项重要加固技术, 是一种埋设在土层中的受拉构件。虽然土层锚杆的应用范围较广, 但对其锚固机理的认识和理论研究相对滞后, 目前还没有一种可以得到广泛认可的工程设计理论, 整体处于经验设计阶段, 有许多问题有待进一步的解决<sup>[1-2]</sup>。玄武岩风化土的工程性质复杂, 容易引发大规模边坡失稳、地基不均匀变形、建筑物变形、岩体崩塌、滑坡、泥石流等工程病害和地质灾害。鉴于玄武岩在我国分布的广泛性, 本文进行了风化玄武岩土质边坡锚杆锚固模型试验研究, 对单根锚杆的应变分布曲线, 同列锚杆在坡面处、滑面处及锚固段末端, 以及坡面渗水前后、不同加载量级、不同时刻的锚杆应变分布曲线进行了对比研究。

## 1 试验方案

### 1.1 模型设计

(1) 模型箱。本次模型试验在模型箱内进行, 箱体的尺寸为 120 cm × 50 cm × 70 cm (长 × 宽 × 高)。模型箱由角钢和高密度板构成, 箱体的各个边角由角钢焊接而成, 箱体四周由高密度板围护。

(2) 模型。模型在箱体内制作完成, 其中 50 cm 长的一侧作为开挖面, 坡率为 1:1。试验所用土由滇黔玄武岩地区现场取土, 土体分别采用红棕色残积土、黄褐色残积土和灰褐色碎石土分层夯实而成, 其力学性质分别为: 红棕色土  $c = 22.97$  kPa,  $\varphi = 28.11^\circ$ ; 黄褐色土  $c = 24.79$  kPa,  $\varphi = 27.15^\circ$ ; 深褐色土  $c = 29.35$  kPa,  $\varphi = 26.94$  kPa。土的物理力学指标如表 1 所示。

表 1 模型土的物理力学指标

土性	密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	含水率/ %	比重	孔隙比	液限	塑限	塑性 指数	液性 指数 (<0.075 mm) / %	黏粒含量
红棕色土	1.71	40.1	2.767	1.27	75.9	47.2	28.7	-0.25	93.86
黄褐色土	1.76	25.6	2.722	0.94	59.6	43.1	16.5	-1.06	90.45
深褐色土	1.79	33.3	2.715	1.02	-	-	-	-	-

(3) 锚杆。由于模型断面较小, 不可能像实际工程那样采用钢筋作为锚杆, 考虑到模型试验与锚杆变形的匹配问题及粘贴应变片的要求, 并综合考虑锚土界面摩阻系数, 试验选取外径 15 mm、壁厚 1 mm 的铜管模拟锚杆。

(4) 加荷系统。土层锚杆所受的主要荷载是土体

收稿日期: 2012-08-20

基金资助: 西部交通建设科技项目(2009318802074)

作者简介: 林 聪, 男, 硕士研究生, 主要从事边坡支护和地下结构方面的研究。E-mail: lincong630@yahoo.com.cn

自重, 因为模型较小, 土体开挖后加在锚杆上的荷载与实际情况差别很大, 为在短时间内直观而准确地模拟锚杆支护结构物的应力及变形过程, 需通过在模型箱的顶面实施加载来补偿自重的不足。

(5) 应变监测系统。应变监测使用 YJ-35 型静态电阻应变仪, 应变片采用半桥式接法。在布设各根锚杆表面的应变片时, 以假定滑面所处位置为基准, 在滑面两侧 5 cm 处对称地布设两个应变片, 再以这两个应变片为基准, 以 20 cm 为间距, 在滑面两侧布设应变片。同时, 为了分析坡面附近和锚固段末端点应力变化情况, 对这两处的应变片进行加密布置(图 1 2)。

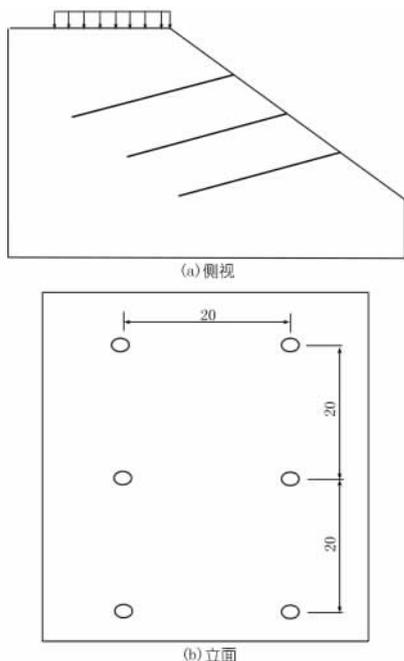


图 1 试验模型示意(尺寸单位: cm)

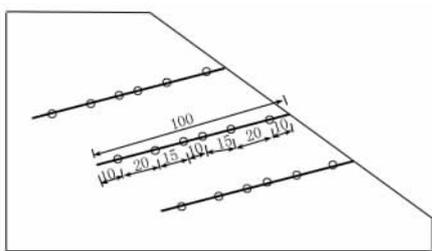


图 2 模型应变片布置(尺寸单位: cm)

### 1.2 室内模型试验步骤

(1) 模型制作。土样装入模型箱后分层夯实固结, 在土体夯实过程中, 用 PVC 管预留出锚孔的位置。土体夯好之后, 拔出 PVC 管, 在土层中布设锚杆, 锚杆布置好之后, 灌注混凝土砂浆来模拟现场灌浆。锚固所用的水泥砂浆的配合比为水: 水泥: 砂 = 1: 2: 4。为使锚杆的锚固强度尽快达到试验所要求的强度, 在水

泥砂浆中掺入速凝剂, 使水泥砂浆能在一周左右的时间达到 28 d 的锚固强度。

(2) 荷载施加。模型制作完毕后, 将应变片导线和应变仪相互连接。准备就绪后, 进行第一次加载, 加载幅值为 0.1 kN, 之后以此类推, 每次加载的幅值为 0.05 kN。

(3) 变形和压力监测。加载后 0.5 h 进行第 1 次数据采集, 至 1 h 进行第 2 次数据的采集。之后每隔 0.5 h 采集 1 次数据。两次加载间隔以上一次加载的变形趋于稳定为准。应变片位置见图 2。

## 2 锚杆试验数据分析

### 2.1 锚固长度对锚杆极限承载力的影响

锚固长度和承载力之间不完全是线性关系, 当锚固长度在一定范围内时, 增加锚固长度可以明显增强抗拔极限承载力, 如图 3 所示。但超过一定锚固长度范围后, 更深处的锚杆已经没有锚固力分布, 而在近坡面的长度内出现锚固应力集中。

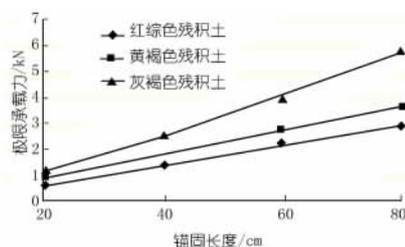


图 3 锚杆极限承载力与锚固长度的关系曲线

### 2.2 不同锚固长度锚杆的荷载位移关系

在加载的初始阶段, 锚杆和浆体间的粘结力起主导作用, 粘结力随着埋深和浆体强度的增大而增大, 荷载由上向下传递, 当该粘结作用失效后, 锚杆和浆体之间发生滑移, 如图 4 所示。

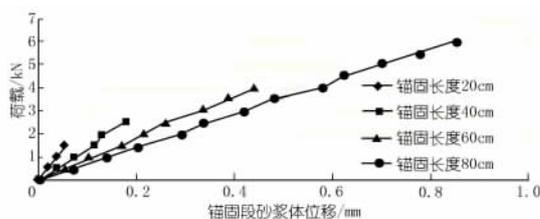


图 4 不同锚固长度的荷载位移曲线

当荷载达到锚固体极限承载力时, 锚固体开始发生破坏。破坏的形式主要有两种: 对于锚固长度较大的锚杆, 随荷载的增加, 锚杆和浆体之间的粘结强度丧失, 锚杆发生了滑移, 在这种情况下, 边坡产生以滑移剪切为主的破坏形式; 而对于锚固长度较小的锚杆, 在

锚杆和浆体的粘结力以及锚杆端部和浆体咬合的共同作用下,发生剪切破坏的范围比较大,在这种情况下,发生滑移开裂破坏。

### 2.3 单根锚杆的应变分布曲线

单根锚杆应变沿长度的分布曲线见图5。

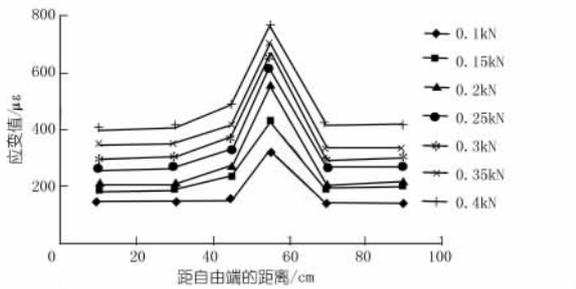


图5 单根锚杆应变沿长度的分布曲线

分析图5的应变分布曲线,可以看出以下规律。

(1) 峰值拉应变出现在锚头附近,即锚杆中应变沿锚杆长度呈中间大、两端小的曲线分布。这主要是因为锚固体承受靠近锚头处传来的拉应力,发生拉伸变形,锚头处拉应力最大,相应拉应变也就最大。在锚固体周围土体不发生相对滑移的情况下,锚头处所受剪切力最大。锚固体应力及与土体间的剪切摩阻力沿锚固体向末端逐渐减小。

(2) 锚杆有一个峰值应变,峰值应变值可以达到平均应变的2~3倍。在一定长度范围内,大约承担了整个锚杆所承担荷载的80%。

### 2.4 同列锚杆不同位置的应变分布曲线

因锚杆上第1个应变片的位置距离坡面很近,可认为第1个应变片反映了坡面所承受土压力的分布规律。图6~8列出了同列锚杆不同位置处的应变分布情况。对其应变分布曲线进行分析比较,可以得到以下规律。

(1) 在荷载作用下,靠近坡顶部的锚杆应变最大,其余部位的锚杆应变较小,坡顶部的锚杆相对其他部位的锚杆承受的荷载较多。

(2) 随着荷载的增加,各点的应变也随之增长,而坡脚的应变曲线相对其他部位较为分散,说明坡脚处的应变增长速率相对其他地方较大。

(3) 坡脚的应变增长速率在坡面、滑面、锚固段末端不同位置中表现出逐渐增大的趋势。由此可以看出,坡顶和坡脚是最容易破坏的位置,在锚杆的设计当中应加强这些部位。

加固后的土锚复合体,在坡顶部受荷载的情况下,由于应力集中,坡顶部的应变最大,随着时间的推移,应力在坡体内部出现重分布,特别是坡脚部位。在达

到稳定状态时,坡顶和坡脚锚杆较坡体其他部位的应变要大。

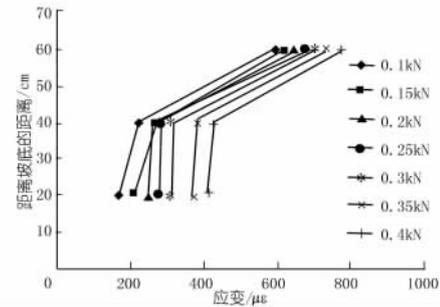


图6 同列锚杆坡面处沿高度的应变

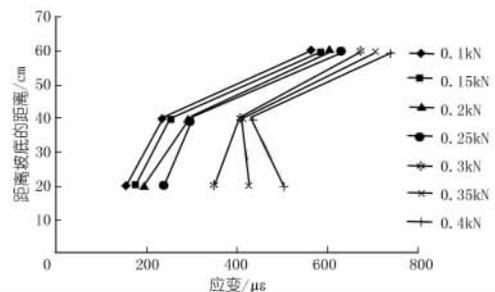


图7 同列锚杆滑面处沿高度的应变

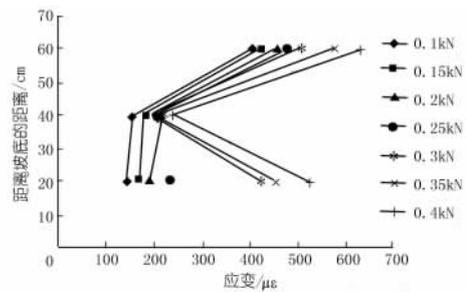


图8 同列锚杆锚固段末端沿高度的应变

### 2.5 渗水对边坡锚杆的影响分析

试验中沿滑面处均匀渗水,以模拟降雨等不利工况,边渗水边进行加载。初始荷载为0.45 kN,加载量为0.05 kN,当逐级加载至0.7 kN时坡体出现明显的变形,锚杆的拔出位移也达到破坏水平,故停止加载,结束试验。

为更好地分析土锚复合体破坏的规律和特征,选取锚固段末端、滑面和坡面3个特征点进行分析。图9~10是锚固末端和滑面处的应变曲线。

对图9~10进行分析比较可以看出,坡脚处的应变在荷载和渗水的双重作用下,应力发生重分布,应变急剧增大。随着荷载的进一步增加,坡体发生破坏,坡脚处的应变又朝相反的方向变化,应变急剧减小,直到出现负值,锚杆被拔出,坡体被破坏。

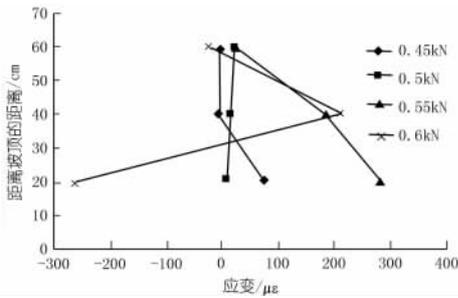


图 9 渗水后同列锚杆锚固段末端应变曲线

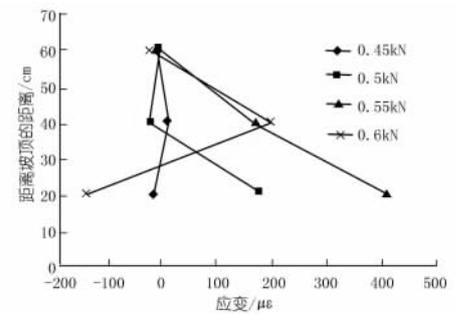


图 10 渗水后同列锚杆坡面处应变曲线

### 3 结论

(1) 锚杆施工时,应该控制好浆体和土体间的粘结质量,预先清洁锚孔,并采用经表面预处理过的锚

杆<sup>[3]</sup>。

(2) 峰值拉应变出现在坡面锚固端附近,即锚杆中应变沿锚杆长度呈中间大、两端小的曲线分布。在坡顶受到荷载作用时,多列锚杆中变形较多集中在坡顶以下的第一排。

(3) 加固后的土锚复合体,以坡顶部的应变最大。随着时间的推移,应力在坡体内部重新分布,达到稳定状态时,坡顶和坡脚处的锚杆较坡体其他部位的应变大。说明坡脚和坡顶处是最容易被破坏的部位,在锚杆的设计过程中应该加强对这些部位的处理。

(4) 在加载的初期,锚杆的应变不同程度地出现负值,说明锚杆并不是仅仅受到拉力,还受到一定压力的作用,同时在荷载的作用下,还产生了一定的弯曲变形,所以严格来说锚杆是一种以承受拉应力为主的拉压弯复合构件。

#### 参考文献:

[1] 汪班桥,门玉明.土层锚杆模型试验研究[J].地球科学与环境学报,2009,31(2):195-199.  
 [2] 汪班桥,门玉明,沈星,等.土层锚杆的常见病害及防治对策研究[J].安全与环境学报,2010,10(1):154-159.  
 [3] 徐永明,仪彤.向家坝水电站尾水洞出口预应力锚杆施工技术[J].人民长江,2011,42(1):26-28.

(编辑:郑毅)

## Model test of mechanical characteristics of anchor bolts in soil slope

LIN Cong<sup>1</sup>, LEI Xuewen<sup>1</sup>, MENG Qingshan<sup>2</sup>, ZHOU Rongfang<sup>1</sup>

(1. College of Urban Construction, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430065, China; 2. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering, Research Institute of Geomechanics, Chinese Academy of Science, Wuhan 430071, China)

**Abstract:** Model tests for slope anchor bolts were carried out aiming at the conditions of weathered basalt soil slope in western Guizhou Province. The tests were to explore the strain distribution curves under various conditions such as the curves of a single bolt, the curves of bolts in a row at slope surface, slide plane and bolt ends, and curves before and after slope seepage or under different load levels. We studied the load-displacement curves of bolts with various anchorage lengths that were under the same drawing force. The results show that the strain distribution along a bolt is a curve characterized as larger in middle and smaller at two ends, while the deformations of bolts generally concentrate at the first row under slope top and the strain at toe and top of a slope is relatively larger than other parts, which results in easier destruction. At the beginning stage of a load process, the negative strain of the anchor bolts manifests that the anchor bolts is a tension-compression-bending composite number.

**Key words:** weathered basalt soil; model test; strain of bolt; slope seepage; destruction of anchor bolt