

# 土层锚杆模型试验研究

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:** 针对土层锚杆应力分布的复杂性, 进行室内模型试验, 利用所得数据, 绘制了拉力型锚杆和压力型锚杆杆体全长上的应变分布曲线、同列锚杆锚固段末端点以及坡面处的应变分布曲线。在所得曲线的基础上, 对坡体中锚杆的应力分布特征以及变化规律进行了分析及讨论, 从而对其工作性能和加固机理进行初步研究。介绍了锚杆上剪应力分布的理论解, 并将试验结果与理论分析结果进行了对比, 两者基本吻合, 验证了本试验结果的合理性和可靠性。

**关键词:** 土层锚杆; 应力传递; 模型试验; Mindlin 问题

**中图分类号:** TU 432 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-6561(2009)02-0195-05

## Analysis by Model Test on Anchors in Clay

WANG Ban-qiao, MEN Yu-ming

(School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

**Abstract** In allusion to complexity of stress distribution within the anchor, an indoor model test on anchors in clay is performed. According to the test data, the strain curves for stretched anchors and pressure-type anchors are plotted and the strain curves for idem anchor on the end of anchorage segment and slope are also plotted. With focus on the stress transmission properties and its changing regulation for anchors in soils, the working performance and mechanisms of the anchor are studied. The authors give a theoretical solution for stress distribution within the anchor, and make a comparison between the theoretical result and the test result. The test result is in accordance with the theoretical analysis result, which validates the rationality and the reliability of the conclusion, thus providing a reference principle for design of anchor in projects.

**Key words:** anchors in soil; stress transmission; model test; Mindlin problem

## 0 引言

土层锚杆是由“新奥法”逐渐发展演化而来的一种挡土结构。自1958年由联邦德国BAUER公司在深基础施工时使用该技术获得成功, 引起了各国工程技术界的普遍重视, 并使该项技术得到了迅速发展。在中国, 锚杆技术应用较晚, 但受到了广泛重视<sup>[1]</sup>。

由于锚杆工作环境(岩土体)的复杂性和不确定性, 对其工作机理的了解以及在设计方法上还不能说已经达到比较完善的地步。锚杆支护设计还主要依靠经验和工程类比并与一定的计算分析和

现场监测相结合。目前已有一些专家学者对这项技术从理论到试验方面进行了研究, 但相对而言, 中国在实际工程中的应用较多, 实验和理论研究较少, 设计计算方法较为粗略。而对黄土地区锚杆支护的加固机理及计算方法研究更少<sup>[2]</sup>。

笔者通过室内模型试验, 对黄土土层中锚杆的应变进行了分析, 从而对其工作性能和加固机理进行了初步研究。

## 1 模型制作

试验在模型箱内进行, 模型箱由角钢和高密度板构成, 箱体的长宽高为2.0 m×1.7 m×1.5 m,

收稿日期: 2008-07-20

基金项目: 陕西省交通科技项目(04-10K)

作者简介: 汪班桥(1977-), 陕西西安人, 女, 讲师, 从事地质工程、安全工程学教学与研究。E-mail: dedgx17@chd.edu.cn

其中 1.7 m 长的一侧作为开挖面,坡率为 1 : 0.75,如图 1。土体采用均质黄土分层夯实而成,土的物理学指标如表 1。土体夯实时在土体中用 PVC 管预留出锚孔的位置。

表 1 模型土的物理学指标

Tab. 1 Physical Mechanic Property of Model Soil

统计项目	密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ( $^{\circ}$ )	塑性 指数	液性 指数
最大值	1.73	35	26.8	13.5	0.17
最小值	1.55	20	21.4	12.8	0.05
平均值	1.61	26	25.5	13.1	0.12

由于模型断面较小,不可能像实际工程中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,综合锚土界面摩擦系数,试验中选取 20 根外径 10 mm、壁厚 1 mm 的铝管作为锚杆,埋设位置见图 1a。各层锚杆的倾角均为  $15^{\circ}$ 。在本次模型试验中,左侧两列锚杆为拉力型,其编号为①-1、①-2、②-1、②-2、③-1、③-2、④-1、④-2、⑤-1、⑤-2;右侧两列锚杆为压力型,其编号为①-3、①-4、②-3、②-4、③-3、③-4、④-3、④-4、⑤-3、⑤-4(图 1a)。压力型锚杆在锚固段尾部固定了一金属垫片,来模拟底部传力锚具。

土体夯好之后,拔出 PVC 管,在土层中布设锚杆,锚杆布好之后,采用灌注石膏来模拟现场灌浆。在坡面处采用 2 cm 厚的泥浆进行护面,待石膏基本硬化、泥浆面层风干之后,采用垫板和销钉来固定锚杆。

各根锚杆表面的应变片在布设时,以滑面所处位置为标准,在滑面两侧 2 cm 处对称地布设两个应变片,再以这两个片子为标准,以 10 cm 为间距,在滑面两侧布设应变片。应变片粘贴位置如图 1b。

土层锚杆的主要荷载是土体自重,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正确地模拟锚杆支护结构物的应力及变形过程,通过在模型箱的顶面实施加载来补偿小模型的自重力。加载采用 PL-1 型强力拉拔仪手摇泵分级加载,在千斤顶下放置垫块以使压力扩散均匀。

2 试验过程

模型制作完毕后,将应变片导线与应变仪相接,面层上的土压力通过放置在面层后的土压力盒测量。试验开始后,首先进行第 1 次加载,并记录面

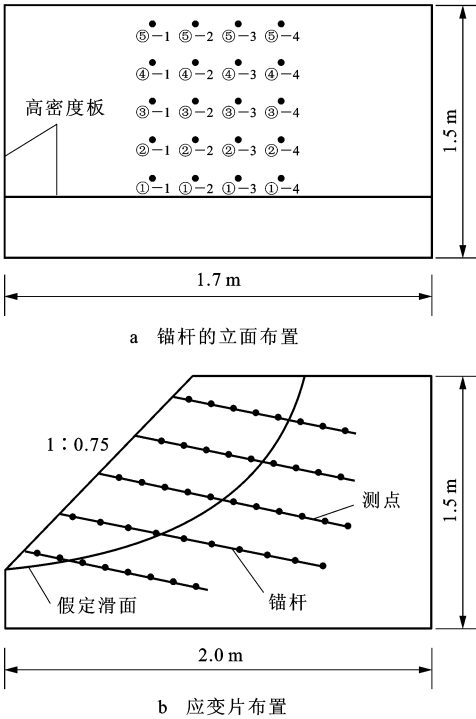


图 1 锚杆的立面布置及应变片布置  
Fig. 1 Arrangement Diagram for Model's Elevation and Strain Gauge

层上的土压力值及土钉上的应变值;待测得的模型面层上的土压力值、应变值变化很小,即变形基本稳定之后,再加下一级荷载。如此进行,每次加载的幅值为 0.5 MPa,一直进行到模型破坏为止。

3 试验结果与分析

对单根锚杆的应变分布曲线、同列锚杆锚固段末端点的应变分布曲线以及同列锚杆坡面处的应变分布曲线进行了分析研究。

3.1 单根锚杆的应变分布曲线

图 2 为拉力型锚杆应变沿长度的分布曲线,以锚杆⑤-1 为例;图 3 为压力型锚杆应变沿长度的分布曲线,以锚杆①-3 为例。通过分析图 2、3 的应变分布曲线,可以看出:

(1)对于拉力型锚杆来说,其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(图 2)。这主要是因为锚固体承受由头部(靠近锚头处)传来的拉应力,发生拉伸变形,头部拉应力最大,拉应变也就最大,位移最大。在锚固体周围土体不发生相对滑移的情况下,头部土体所受剪切力最大,锚固体应力与土体间的剪切摩阻力沿锚固体向末端逐渐减小。

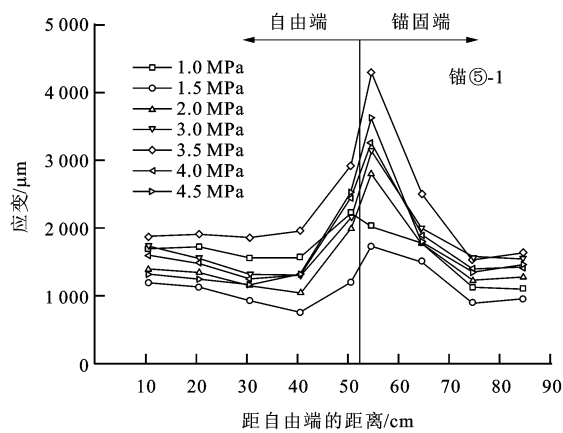


图2 锚杆应变沿长度的分布曲线(锚杆⑤-1)

Fig. 2 Curve of Anchor's Strain Along Length (Anchor ⑤-1)

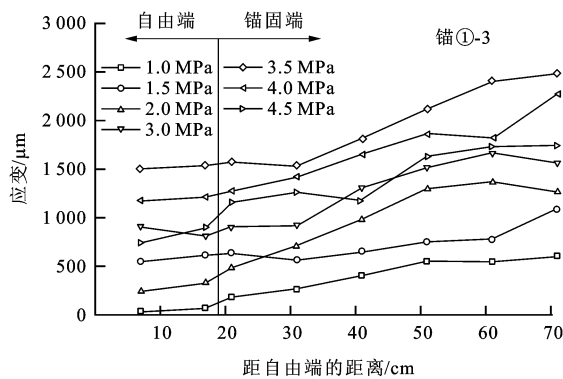


图3 锚杆应变沿长度的分布曲线(锚杆①-3)

Fig. 3 Curve of Anchor's Strain Along Length (Anchor ①-3)

(2)对于压力型锚杆来说,其峰值压应变出现在锚固段末端附近,从锚固段末端到锚头附近,压应变从大到小递减,压应变的低峰值出现在滑面附近(图3)。这主要是因为对于压力型锚杆来说,锚固体承受由末端传来的压应力,发生压缩变形。锚固体应力、应变、位移与土体间的剪切摩阻力均在锚固体末端,而头部最小<sup>[3]</sup>。

3.2 锚杆应变峰值的位置及大小

对图2、3进行分析,还可以看出,无论拉力型锚杆还是压力型锚杆,都有一个峰值应变,该峰值应变值都可达平均应变的2~3倍,最高可达3.6倍。在受力端向前至1/3~2/5杆全长范围内,承担了约整个锚杆所承担剪力的80%。这说明,无论拉力型锚杆还是压力型锚杆,锚固体与土体之间剪应力的分布都很不均匀,其分布范围仅在锚固体的有限区域内<sup>[4]</sup>。

3.3 锚固段末端点的应变分析

图4为同列拉力型锚杆锚固段末端点沿坡高的变形曲线,以第2列锚杆为例;图5为同列压力型锚杆锚固段末端点沿坡高的变形曲线,以第3列锚杆为例。

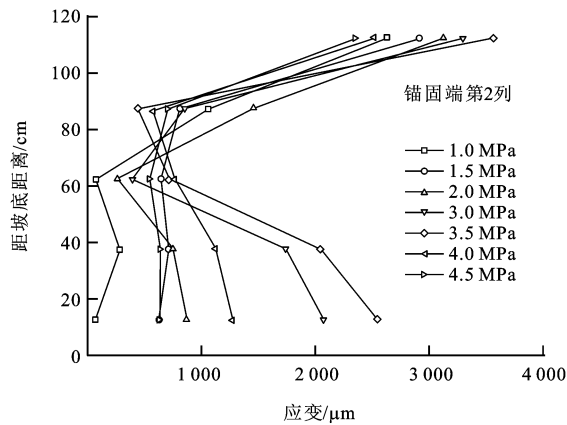


图4 自左向右第2列锚杆锚固段末端点应变分布

Fig. 4 Strain Figure of the End of Anchorage Segment for the Second Anchor from Left to Right

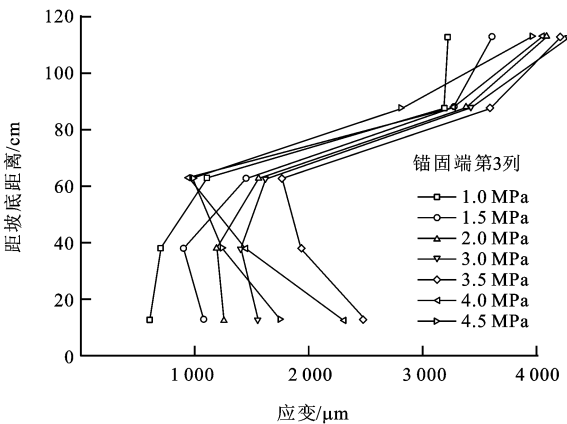


图5 自左向右第3列锚杆锚固段末端点应变分布

Fig. 5 Strain Figure of the End of Anchorage Segment for the Third Anchor from Left to Right

对图4和图5的应变分布曲线进行分析,可以看出:

(1)在坡顶受荷载作用时,拉力型锚杆的变形较多集中在了坡顶以下第1排,而压力型锚杆则在坡顶以下第1排和第2排的变形都较大,这也说明压力型锚杆系统在系统内部力的分配要优于拉力型锚杆系统的分配。

(2)在荷载作用下,无论是拉力型锚杆还是压力型锚杆系统,靠近坡顶部的锚杆应变最大,其余的几排锚杆应变较小。也就是说,由于在坡体上方施加荷载所引起的局部应力集中,在锚杆支护中,

坡顶部锚杆相对其他部位锚杆承受的荷载较多。

(3)无论拉力型锚杆还是压力型锚杆系统,随着荷载的增加,各点的应变也随之增长,但坡脚的应变增长速率相对其他地方较大。

另外,试验结束后在坡体铲除过程中发现在坡体内最下面一排锚杆的锚固段末端点处出现了一道宽为 5 cm 左右的裂缝。这一现象进一步证明了锚固段末端点的应变增长速率相对其他地方较大这一规律。上述分析说明,加固后的土锚复合体,在坡顶部受荷的情况下,由于应力集中的原因,坡顶部应变最大,随着时间的变化,应力在坡体内部重分布,达到稳定状态时,坡顶和坡脚锚杆较坡体其他部位的锚杆应变大。

3.4 坡面处的应变分布规律

因锚杆上的第 1 个应变片的位置距离坡面只有 5 cm,可以近似地认为第 1 个应变片所反映的规律为坡面所承受的土压力的分布规律。

图 6 为同列拉力型锚杆坡面处的点沿高度的变形曲线,以第 1 列锚杆为例;图 7 为同列压力型锚杆在坡面处的点沿高度的变形曲线,以第 3 列锚杆为例。

通过对图 6、7 的应变分布规律进行分析,可以看出:

(1)拉力型锚杆的变形也多集中在坡顶以下第 1 排,压力型锚杆变形集中在坡顶以下的第 1 排和第 2 排。而且在坡面处拉力型锚杆几乎各排的变形都大于压力型锚杆的变形,与锚固段末端点的变形趋势一致。

(2)和锚固段末端点的变形曲线一样,无论拉

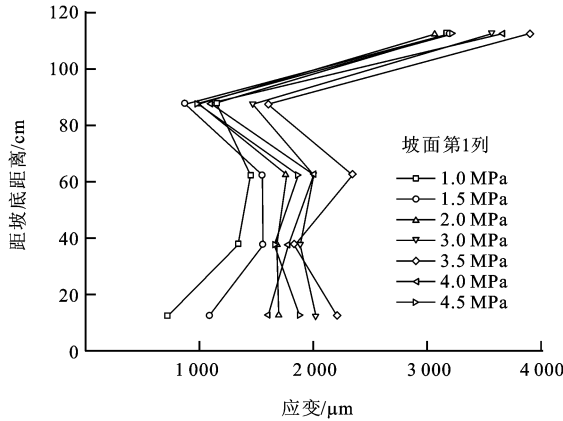


图 6 自左向右第 1 列锚杆坡面变形

Fig. 6 Strain Figure of the Grade Surface for the First Anchor from Left to Right

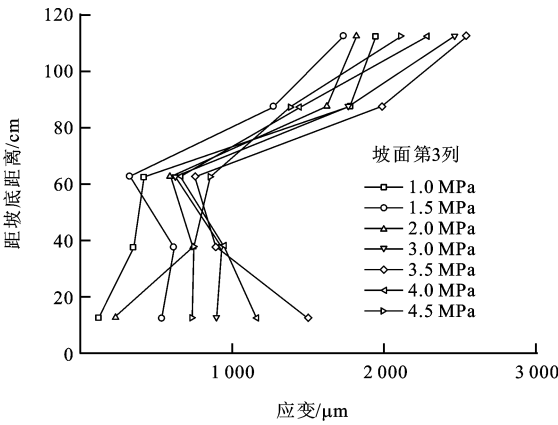


图 7 自左向右第 3 列锚杆坡面变形

Fig. 7 Strain Figure of the Grade Surface for the Third Anchor from Left to Right

力型锚杆还是压力型锚杆系统,在坡顶加载的情况下,坡脚的应变增长速率相对其他地方较大。

对于锚杆锚固段末端点及坡面处的应变分析表明,坡脚处及坡顶是最容易破坏的部位,在锚杆设计中应予以加强处理。

试验结束,卸掉面层后,面层上的裂纹发展规律与坡体的应变分布规律相吻合,即最下面的裂纹最为密集,最上面的裂纹则最宽、最长,而中部的裂纹则次之。

4 锚杆的破坏形式

锚杆拉拔力的大小由 3 个强度指标决定,即杆体抗拉强度、杆体与注浆体间的抗剪强度和锚固段注浆体与周围土体的抗剪强度,其中注浆体与周围土体的抗剪强度最小,所以锚杆破坏形式大多为注浆体与土体的滑移。

5 剪应力分布的理论解

将锚杆周围的岩土体视为半空间,将锚杆的作用用深度  $h$  处的集中力  $Q$  代替,如图 8,在  $c(x, y, z)$  处的垂直位移  $w$  可由 Mindlin 位移解<sup>[5]</sup> 确定

$$w = \frac{Q(1+\mu)}{8\pi E(1-\mu)} \left[ \frac{3-4\mu}{R_1} + \frac{8(1-\mu)^2 - (3-4\mu)}{R_2} + \frac{(z-h)^2}{R_1^3} + \frac{(3-4\mu)(z+h)^2 - 2hz}{R_2^3} + \frac{6hz(z+h)^2}{R_2^5} \right] \quad (1)$$

式中: $E$  为岩土体的弹性模量; $\mu$  为岩土体的泊松比。

$$R_1 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z-h)^2}$$

$$R_2 = \sqrt{x^2 + y^2 + (z+h)^2}$$

在孔口处,  $x=y=z=0$ , 则式(1)可简化为

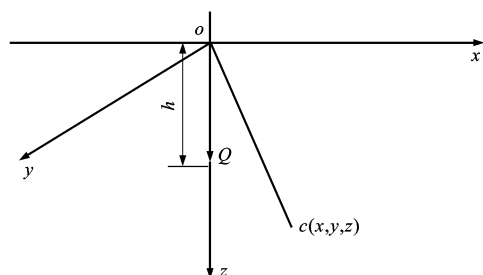


图 8 Mindlin 解的计算解

Fig. 8 Computation Graph for the Mindlin Explanation

$$w = \frac{Q(1+\mu)(3-2\mu)}{2\pi hE} \quad (2)$$

假设埋入岩土体中的锚杆为半无限长, 锚杆与水泥浆体之间的变形处于弹性状态, 则孔口处岩土体的位移与锚杆体的总伸长量相等, 从而可以建立以下方程

$$\int_0^{\infty} \frac{(3-2\mu)r}{2G} \frac{\tau}{z} dz = \int_0^{\infty} (Q - 2\pi r \int_0^{\infty} \tau dz) dz \quad (3)$$

式中:  $r$  为锚杆杆体半径;  $E_a$  为锚杆杆体的弹性模量;  $A$  为锚杆体的截面积;  $G$  为岩土体的剪切模量;  $\tau$  为锚杆体所受的剪应力。

通过变换, 并利用边界条件  $z \rightarrow \infty, \tau = 0$ , 最后, 可得锚杆所受的剪应力沿杆体分布为

$$\tau = \frac{Ptz}{2\pi r} e^{\frac{1}{2}tz^2} \quad (4)$$

式中:  $t = \frac{1}{(1+\mu)(3-2\mu)r^2} \left( \frac{E}{E_a} \right)$ ;  $P$  为锚杆受的拉拔力。

将此规律绘于图 9 中, 分析图中曲线可知, 锚固段受力有以下特点:

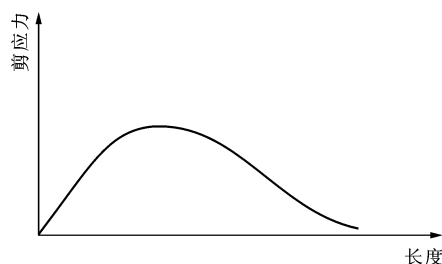


图 9 剪应力分布曲线

Fig. 9 Distributing Curve for Shearing Strength

(1) 在孔口处锚杆所受的剪应力为零, 孔口向内剪应力急剧增大。

(2) 锚杆杆体所受的剪应力经过最大值后, 随

杆长向地层深处逐渐减小, 趋于零。

(3) 由式(4)看出, 锚杆的剪应力大小与锚杆的拉拔力成正比, 还受土体与锚杆弹性模量比值的影响, 该理论分析与本次的试验结果较吻合。

## 6 结语

(1) 对于拉力型锚杆来说, 其峰值拉应变出现在滑面附近, 从滑面附近到锚固段末端, 拉应变从大到小进行递减; 对于压力型锚杆来说, 其峰值压应变出现在锚固段末端附近, 从锚固段末端到锚头附近, 压应变从大到小进行递减。

(2) 无论拉力型锚杆还是压力型锚杆, 在临近滑面处都出现应力集中现象, 即有一个峰值应变, 随着荷载的加大, 该峰值逐渐向锚固体的末端推进, 当锚固端剪应力超过土体的抗剪强度, 锚杆将以渐进的方式发生滑动, 直到锚头被拔出, 锚杆宣告破坏。

(3) 整个锚杆挡墙在受力时, 最上面的锚杆所受的拉力最大, 但是坡脚处的锚杆所受的拉力较其他部位增长更快。这也就解释了面层上裂纹的分布规律, 即最下面的裂纹最为密集, 最上面的裂纹则最宽、最长, 中部的裂纹次之以及破坏时坡体内下侧锚杆锚固段末端处所出现的明显裂缝。建议在锚杆支护设计时, 可适当加长坡顶和坡脚锚杆的长度。

(4) 压力型锚杆与拉力型锚杆相比, 压力型锚杆所受的最大拉应变要小, 压力型锚杆在系统内部力的分配要优于拉力型锚杆系统的分配。所以, 在实施锚杆挡墙时, 推荐优先选用压力型锚杆, 有条件时, 最好采用压力分散型锚杆。

## 参考文献:

- [1] 程良奎, 刘启琛. 岩土锚固工程技术的应用与发展[M]. 北京: 万国学术出版社, 1996.
- [2] 陈广峰, 米海珍. 黄土地层中锚杆受力性能试验分析[J]. 甘肃工业大学学报, 2003, 29(1): 116-119.
- [3] 邢占清, 杨健, 杨晓东. 压力分散型无黏结预应力锚索作用机理及内锚固段长度研究[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2006, 4(2): 88-92.
- [4] 王树仁, 何满潮, 金永军. 拉力集中型与压力分散型预应力锚索锚固机理[J]. 北京科技大学学报, 2005, 27(3): 278-282.
- [5] 余民久, 熊峰. 土层锚杆锚固段应力分布规律研究[J]. 四川水利, 2006, 27(6): 19-21.