

# 昆明红粘土地层锚固力试验研究

孙芳 陈颖辉 催连莲

(昆明理工大学建筑工程学院 昆明 650093)

**摘要:**在昆明世博园周边边坡治理过程中,为了更好地指导实际工程,根据试验结果,研究预应力锚索在红粘土中的受力特性。分别采用Phillips和剪应力均布法两种锚固段剪应力分布理论,对试验数据进行分析研究,推导出了两种锚固力的简要计算公式。

**关键词:**红粘土 预应力土层锚索 承载力

## 1 引言

由于地质条件的隐蔽性、复杂性以及勘探测试条件的局限性,致使地质勘探和测试资料不可能全面揭示边坡的本来面貌,加上施工过程中不确定因素过多,有可能导致边坡开挖后发生失稳<sup>[1]</sup>。

## 2 预应力锚索对边坡的加固作用机理<sup>[2]</sup>

锚索技术是指在天然地层中钻孔至稳定地层,插入拉杆或钢绞线,然后在钻孔中灌注水泥浆或水泥砂浆,在有些情况下还可以施加预应力,使岩体或土体边坡达到稳定的一种岩土锚固技术。锚索锚固技术能够充分发挥岩土体的能量,充分调用和提高岩土体的强度和自稳能力,大大减轻结构自重,节约工程材料,确保施工安全,具有明显的经济效益和社会效益。但是,由于预应力锚固作用机理十分复杂,影响因素很多,目前这一方面的研究还处在工程实践之后,远远不能满足工程应用的需求。

本文研究在岩土工程中被大量使用的锚固段为直筒型的拉力型锚索。对于直筒型拉力锚索,传统的锚固力计算采用剪应力均匀分布的建设,而实际锚固体的受力并不是均匀分布的。本文以昆明红粘土地层锚固力试验为基础,探讨该地区锚固力特点,进行科学的分析,及时合理地调整设计方案,保障了研究区域内边坡的安全稳定性。

### 2.1 指数型分布

在这种理论方法中,最具有代表性的是Phillips的表述。对于拉力型锚索,认为锚固体表

面与地层之间的剪应力沿锚固段长度呈指数关系分布(见图1)。

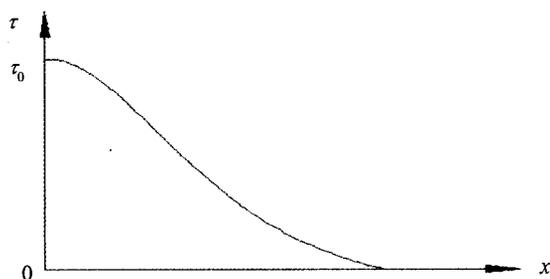


图1 Phillips公式剪应力分布曲线

其表达式为

$$\tau_x = \tau_0 e^{-\frac{Ax}{d}} \quad (1)$$

式中:  $\tau_x$ —距离锚固段近端 $x$ 处的剪应力;

$x$ —距离锚固段近端的距离;

$\tau_0$ —锚固段近端处的剪应力;

$d$ —锚索直径;  $A$ —常数。

对于(1)式,沿锚固段长度 $L$ 积分,可得到极限锚固力 $T_U$ 的理论表达式:

$$T_U = \frac{1}{A} \pi d^2 \tau_0 (1 - e^{-\frac{AL}{d}}) \quad (2)$$

公式(2)中,由于锚固段长度 $L$ 远远大于锚索的直径 $d$ ,所以 $\frac{L}{d}$ 趋近于 $\infty$ ,则 $e^{-\frac{AL}{d}}$ 趋近于0,(2)式可简化为

$$T_U = \frac{1}{A} \pi d^2 \tau_0 \quad (L \gg d) \quad (3)$$

由上式可以看出,当锚固段的长度远远大于锚固体直径时,锚固力的大小与锚固段长度没有直接的关系,或者说关系不大,这与试验中表现

出来的情况相吻合：当锚固段长度增加到足够长后，再增加锚固段的长度，对极限锚固力的影响很小。

## 2.2 均匀分布型

现行的《建筑边坡工程技术规范》<sup>[3]</sup>等相关规范中，都假定锚固体的黏结应力为均匀分布。在这种假设条件下，锚索在岩土中的极限锚固力可以表示为

$$T_U = \pi DL\tau_s \quad (4a)$$

或

$$T_U = \alpha \pi DLc_u \quad (4b)$$

式中：

$T_U$ —锚索极限锚固力 (kN)；

$D$ —钻孔直径 (m)；

$L$ —锚固段长度 (m)；

$\alpha$ —与土体不排水抗剪强度有关的系数；

$c_u$ —锚固段范围内土体不排水抗剪强度平均值 (kPa)；

$\tau_s$ —孔壁与注浆体之间的极限黏结强度 (kPa)。

由于岩土体强度、所使用的锚索类型和施工方法都影响着粘结强度的发挥，而岩土体类型千差万别，所以各种现有资料所提供的数据和实际

的黏结强度都可能有一定的出入。

## 3 锚索破坏性张拉试验

### 3.1 试验场区概况

本次研究的试验场地为昆明市郊世博园西侧的世博生态城边坡，此边坡支护为永久性支护，多个边坡剖面坡顶和坡脚都有拟建建筑，还缺乏相关土力学参数，且还未作边坡稳定性评估工作，为使此工程在技术上安全可靠，经济上合理，施工上可操作性强，根据场地情况设计4根预应力锚索的试验，以得出该边坡土层达到的最大锚固力值，指导设计参考，以便作出最经济合理的支护方案。

### 3.2 试验过程

试验采用湿法钻进，共钻孔4个，锚索长度为18m，自由段为8m，锚固段为10m；成孔孔径为130mm；锚索与水平方向夹角为15°（见图2）。锚索材料使用3S $\phi$ 15.24低松弛钢绞线。纯水泥注浆，使用P.S32.5硅酸盐水泥，水灰比为0.5。采用二次压力注浆，应在一次注浆结束24h~48h进行，注浆压力不小于0.3MPa。

张拉设备采用标定后的空心千斤顶，锚头位移采用普通钢尺测量。张拉力分级为40kN，直至锚索破坏。

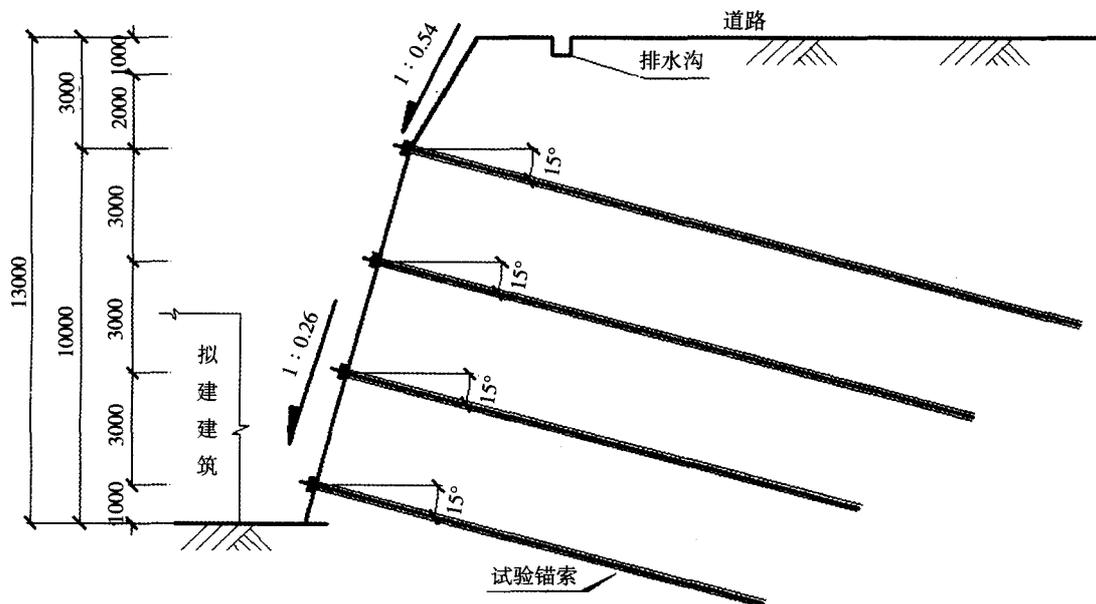


图2 试验锚索孔位及边坡剖面图

### 3.3 试验数据分析

根据现场张拉试验数据，可以做出各孔的张拉力T和位移S的关系曲线（如图3）。

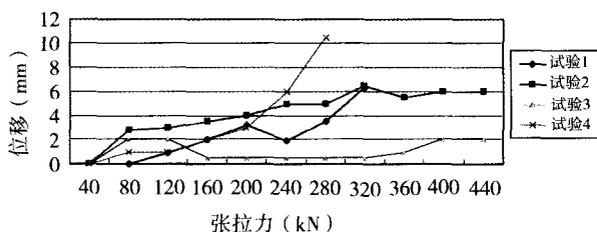


图3 锚索张拉力和位移曲线图

根据对曲线的分析，可得到每根锚索的极限张拉力 $T_{max}$ ，同时根据《建筑边坡工程技术规范》<sup>[3]</sup>上的岩土参数的分析和选定规则，可以计算出每根锚索的张拉力标准值 $T_k$ ，具体见表2。

表2 锚索张拉试验数据统计分析表

孔号	孔径 (mm)	锚固段长度 (m)	极限张拉力 $T_{max}$ (kN)	张拉力标准值 $T_k$ (kN)
1	130	10	320	288
2	130	10	360	320
3	130	10	400	
4	130	10	240	210

### 4 锚固力与红粘土性质的关系分析

根据试验数据和锚固力计算理论推导出简单的计算公式。

#### (1) Phillips公式法

公式(1)中， $\tau_0$ 为锚固段近端处的剪应力，此最大剪应力最大值取决于土体的抗剪强度，即

$$\tau = c + \sigma \tan \varphi \quad (5)$$

式中： $c$ —锚固区土体的凝聚力 (kPa)；

$\varphi$ —锚固区土体的内摩擦角 (°)；

$\sigma$ —孔壁周边的法向应力 (kPa)。

$c$ 、 $\varphi$ 值完全取决于锚固区土体的性质， $\sigma$ 值受到地层压力和注浆工艺等因素的影响。此次试验中锚索采用二次注浆工艺，但注浆采用孔口不封闭的方式，所以 $\sigma$ 值主要受第二次注浆压力和上覆盖土层压力决定，公式(5)可改写为：

$$\tau = c + K\gamma h \tan \varphi \quad (6)$$

式中： $h$ —锚固段以上的地层覆盖厚度 (m)；

$K$ —锚固段孔壁的土压力传递系数；

$\gamma$ —土体的重度。

对于土压力传递系数 $K$ ，由于注浆压力不能大于上覆盖土层的压力，所以 $K$ 不应大于1，并可由下式表示：

$$K = \frac{p}{\gamma h} \quad (7)$$

式中： $p$ —注浆压力 (kPa)。

将(6)和(7)式带入(3)式，整理得

$$T_U = \frac{1}{A} \pi d^2 (c + p \tan \varphi) \quad (8)$$

则

$$A = \frac{\pi d^2 (c + p \tan \varphi)}{T_U} \quad (9)$$

把表3中的试验数据带入(9)式中

表3 公式(10)中各试验数据取值表

参数	$d$ (m)	$c$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h$ (m)	$\varphi$ (°)	$T_u$ (kN)	$p$ (kPa)
取值	0.13	30	20	15	13	320	200

$$A = \frac{3.14 \times 0.13^2 (30 + 200 \times \tan 13^\circ)}{320} = 0.0126$$

由此可以得出，在考虑锚固体黏结力不均匀状态下，利用Phillips公式推导的锚固力计算公式为：

$$T_U = \frac{1}{0.0126} \pi d^2 (c + p \tan \varphi) \quad (10)$$

#### (2) 规范推荐法

公式(4b)就是基于黏结力均匀分布这样的假设推导出的一个计算公式，经变换得到：

$$\alpha = \frac{T_U}{\pi D L c_u} \quad (11)$$

为求得 $\alpha$ 值，上式中的 $T_U$ 值取平均值，其余参数取值见表4。

表4 公式(12)中各参数取值表

参数	$d$ (m)	$c$ (kPa)	$\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	$h$ (m)	$\varphi$ (°)	$T_u$ (kN)	$L$ (m)
取值	0.13	30	20	15	13	320	10

(下转第19页)

令点的同步,保证系统的同步精度。同时系统还设置了超差自动报警停机功能,一旦某跟随点同主令点的同步高差超过某一设定值,系统将自动报警停机,以便检查。提升高度同步调节见图10。

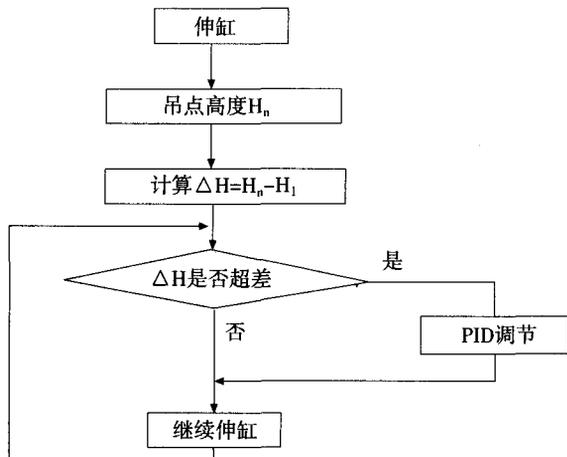


图10 提升高度同步调节框图

## 5 激光测距传感器使用注意事项

由于激光测距传感器为光学仪器,安装和拆卸时要轻拿轻放,安装时最好将激光向下打在被测物体上;若激光向上打在被测物体上,则应采

取措施避免阳光直接照在光学接收板上。不要注视激光束,确保激光瞄准时位于眼睛水平线上方或下方(尤其是固定安装在机械设备上等情况)。不要将激光测距传感器直接瞄准太阳。

当被测距离大于60m时,应使用专用接收板的褐色面。

激光测距传感器为IP65,使用时应防止灰尘和水汽浸入。

## 6 结论

本文利用RS422/85串行通信功能和协议,实现了用单台PLC控制多台激光测距传感器的任务,不仅大大简化了现场布线及测距传感器的安装,节省了施工费用,而且可靠性也大幅提高。该系统自2006年投入运行以来,工作正常,整个控制系统灵活方便,具有很大的实用和推广价值。

## 参考文献

- [1] 激光测距传感器DLS-B、DLS-BH. 技术参考手册 Dimetix 2006
- [2] Cx-Protocol使用手册. OMRON. 1999

(上接第14页)

由(12)式可计算 $\alpha$ 值

$$\alpha = \frac{330}{3.14 \times 0.13 \times 10 \times 30} = 2.69$$

由此,由黏结力均布法推导出的锚固力计算公式为

$$T_U = 2.69\pi DLc_u \quad (12)$$

在后期的锚索设计中,应用以上的计算公式来计算锚索的张拉力,在后期的张拉中,锚索都能达到设计的张拉力,这也说明该公式在这一区域的适用性。

## 5 结论

由试验过程和以上的试验数据、作图分析和数值计算分析,可得出以下结论:

(1) 一般情况下,锚索的破坏在红粘土中表现为红粘土层和注浆体之间的黏结面出现破裂,导致锚索的破坏失效。

(2) 当锚索破坏失效后,虽然黏结力失去

了作用,但是注浆体与土层之间的摩擦力还是比较大的,几乎可以达到最大锚固力的40%~70%左右。所以当锚固段长度足够长时,锚固端部分失效后锚固力不会产生急剧的下降。

(3) 黏结应力不均匀分布更能真实的反映锚索锚固段锚固力的实际分布,Phillips公式可以较好的反映锚固段黏结应力的分布状况。

(4) 本文通过有限的试验推导了红粘土地层锚固力的计算公式,该公式是否适用于不同的土体和地区,还有待于进一步的研究。

## 参考文献

- [1] 沈强,陈从新. 高速公路失稳高边坡动态设计[J]. 岩土力学. 2003, 24: 283~286
- [2] 闫莫明,徐祯祥,苏自约 主编. 岩土锚固技术手册[M]. 人民交通出版社. 2004
- [3] GB150330-2002. 建筑边坡工程技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社. 2002
- [4] 岩土工程手册编写委员会. 岩土工程手册[S]. 北京:中国建筑工业出版社. 1994