

文章编号:1001-5485(2009)12-0029-04

# 基于电测法的三峡地下厂房天锚荷载 应变监测试验研究

黄祥<sup>1</sup>, 饶志强<sup>2</sup>, 宁晶<sup>1</sup>

(1. 长江科学院 工程安全与病害防治研究所, 武汉 430010; 2. 华中科技大学 文华学院, 武汉 430074)

**摘要:**三峡地下厂房天锚作为桥式起重机吊装的重要设施,在投入生产之前采用电测法对其安全性进行了荷载试验检查,并对荷载试验过程中的天锚锚杆受力及其变化情况采用电测法进行了应变监测。监测成果显示,电阻应变计实测规律性明显,且测值均未超过设计允许范围,表明天锚是安全的。

**关键词:**电测法; 地下厂房; 天锚; 荷载; 应变; 监测

**中图分类号:**TV698.1      **文献标识码:**A

## 1 概述

电测法的基本原理是用电阻应变计测定构件表面的线应变,再根据应变-应力关系确定构件表面应力状态的一种实验应力分析方法。由于这种方法具有轻便灵活、操作简单、测量灵敏度和精度高、测量范围广、频率响应好、经济效益高等诸多优点而被广泛地应用于国防、航天、机械、化工、土木工程、水利水电、计量、传感器制造等多个行业领域的科研和工程实际。

在三峡地下厂房桥式起重机小车安装过程中,需用天锚进行吊装。天锚在使用之前,须对其安全性进行荷载试验检查。为了监测荷载试验过程天锚锚杆的应变情况,考虑到荷载试验过程时间短暂,且为了减少投入、节约成本,设计在指定部位布置了一定数量的电阻式应变计。

## 2 电阻应变计的测量原理及结构

### 2.1 电阻应变计的测量原理

导体在受力变形时,引起其电阻值发生变化,这种现象称为金属电阻应变效应。电阻应变计就是利用这种原理制成的。导体的电阻由下式计算:

$$R = \rho \frac{L}{S} \quad (1)$$

式中: $\rho$ 为电阻丝材料的电阻率; $L$ 为电阻丝长度; $S$ 为电阻丝的截面积。

导体在受力变形后,式(1)中 $\rho, L, S$ 均会发生

变化,因而引起 $R$ 值发生变化,即: $dR = \frac{L}{S}d\rho + \frac{\rho}{S}$

$dL - \frac{\rho L}{S^2}dS$ ;代入(1)得

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dL}{L} - \frac{dS}{S} \quad (2)$$

由材料力学可知,杆件轴向受拉或受压时,不仅轴向尺寸会发生变化,径向尺寸也会发生变化。轴向变化相对量称为轴向应变 $\epsilon = dL/L$ ,径向变化相对量称为横向应变 $\epsilon_1 = dr/r$ 。在弹性范围内,轴向拉压杆件时的横向应变与轴向应变之间的关系为 $\epsilon_1 = -\mu\epsilon$ , $\mu$ 为材料的泊松比。由 $S = \pi r^2$ 得

$$dS/S = -2\mu\epsilon \quad (3)$$

代入(2)式,得

$$\frac{dR/R}{\epsilon} = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (4)$$

令 $K = \frac{dR/R}{\epsilon}$ ,则

$$K = (1 + 2\mu) + \frac{d\rho/\rho}{\epsilon} \quad (5)$$

即 $dR/R = K\epsilon$ 。

式(5)中, $K$ 称为金属电阻丝的相对灵敏系数。从式(4)可见,金属电阻丝的相对灵敏系数受两个因素影响,一个是受力后材料几何尺寸发生变化所引起的,即 $1 + 2\mu$ ;另一个是受力后材料电阻率发生变化所引起的,即 $\frac{d\rho/\rho}{\epsilon}$ ,这是因为材料发生变形时,它的自由电子的活动能力和系数都发生变化所致。

当电阻应变计粘贴在被测试件上时,会随试件受力而产生变形,电阻的应变即可反应试件的应变,

利用应变仪测量出电阻变化量,从而实现了试件应变的电测量。

### 2.2 电阻应变计的结构与分类

电阻应变计主要由敏感栅、基底、引出线、基盖层 4 部分组成(见图 1)。敏感栅是把应变转换成电阻变化的敏感原件。敏感栅贴在一张薄片上,该薄片称为基底。为了保护电阻丝,一般在基底上再贴上一薄片称为保护片。引出线为从敏感栅引出电信号的金属丝或金属薄带。

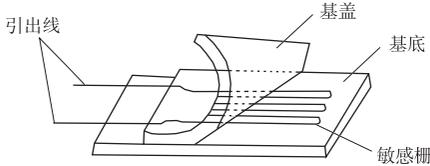


图 1 电阻应变计结构图

Fig. 1 Structure of a electric resistance strain gage

目前市场上流行的电阻应变计种类非常丰富。按照敏感栅材料可分金属、半导体、金属或金属氧化物浆料 3 类;按照安装方式可分粘贴型、焊接型、喷涂型 3 类;按照使用温度可分低温、常温、中温、高温应变计 4 类;按照基底材料可分纸基和胶基 2 种。

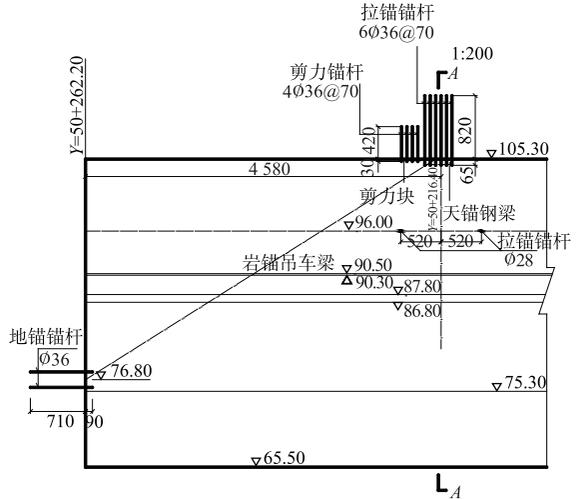
### 3 工程实例

三峡地下电站位于长江右岸白岩尖山体内部,共布置有 6 台机组,每台机组装机容量 70 万 kW。电站主要由引水隧洞、厂房、尾水隧洞等组成。为了给桥式起重机安装提供预留挂点,在厂房布置了 2 个天锚。天锚锚杆和剪力锚杆竖向布置在厂房安装场顶拱,每组各 20 根,均为砂浆锚杆,天锚和剪力锚杆长分别为 8.85 m 和 4.5 m;锚杆孔径均为 76 mm,型号为  $\phi 36$  mm 螺纹钢, M30 砂浆灌注,均在孔口段设有无粘结段,其中天锚锚杆在孔口向孔内为 2 m 段用沥青涂刷成无粘结段。单个天锚由 1 根钢梁与 12 根天锚锚杆连接而成;在天锚钢梁右端设有与天锚相匹配的剪力块,单个剪力块由 1 根钢梁与 8 根剪力锚杆连接而成(见图 2、图 3)。

天锚在使用过程中,其锚杆受力可能会出现不均匀现象,因此天锚在使用之前须对钢梁及天锚进行荷载试验,同时对锚杆应变情况进行监测。为此选择了 4 根天锚锚杆进行监测,其中监测天锚锚杆沿轴向粘贴 2 片应变计,与孔口的距离分别为 30 cm 和 130 cm。电阻应变计采用的是日本 TML 株式会社的 WFAC-6-17-5L 胶基型康铜箔式应变计。

#### 3.1 监测成果

根据设计技术要求,单个天锚额定荷载为 80 t



注:图中结构尺寸以m计,标准尺寸以mm计,下同。

图 2 天锚及锚杆布置剖面图

Fig. 2 Section of the up-anchor and anchorage bar arrangement

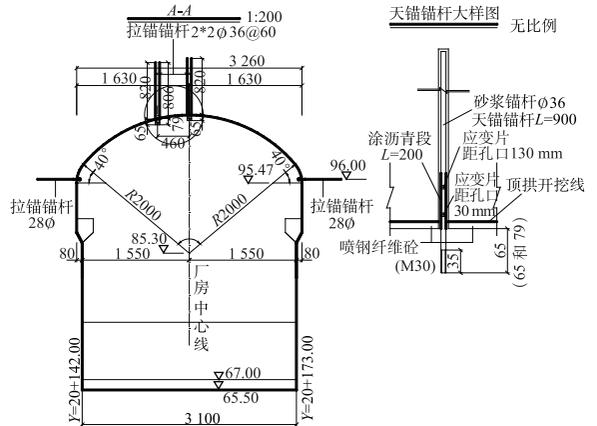


图 3 天锚锚杆断面及大样图

Fig. 3 Up-anchor and anchorage bar section as well as its detail drawing

(竖向),试验按照额定荷载的 25%、50%、75%、100%、125% 分五级进行。厂房 1 200 t/125 t 桥式起重机最大件小车重 120 t,因此单个天锚实际荷载按照 60 t 计算,施工单位根据现场实际情况对设计要求作了适当的简化调整,动静载分 64 t 和 72 t 两级进行试验,采用在吊篮内加载配重块的方式进行。空载是指吊篮挂在天锚挂钩上,但未装配重块的情况;动载是指吊篮装有配重块,并进行升降动作;静载是指吊篮装有配重块悬在空中离地面 100 mm 而停止不动的情况;卸载则是指装有配重块的吊篮缓慢降至地面的状况。

两种工况下的 2 组天锚荷载试验应变实测监测成果特征值见表 1,其中下游 1 组天锚监测过程线见图 4。

#### 3.2 成果分析

监测成果表明,空载、动载、静载、卸载各种工况

表 1 应变监测成果特征值统计表

Table 1 Statistics of eigenvalues of strain monitored results

组号	部位		测点编号	应变测值/ $10^{-6}$	
	孔号	距孔口距离		64 t	72 t
上游 1 组 天锚	18 <sup>#</sup>	1.3 m	S18-01	276	319
		0.3 m	S18-02	297	247
下游 1 组 天锚	22 <sup>#</sup>	1.3 m	S20-01	157	184
		0.3 m	S20-02	144	170
下游 1 组 天锚	23 <sup>#</sup>	1.3 m	S22-01	98	112
		0.3 m	S22-02	142	160
下游 1 组 天锚	23 <sup>#</sup>	1.3 m	S23-01	200	222
		0.3 m	S23-02	243	276

注:应变特征值均为最大值。

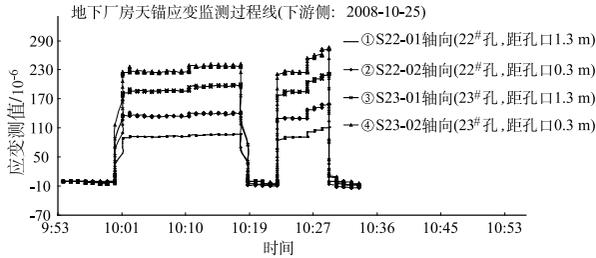


图 4 下游 1 组天锚锚杆应变监测过程线

Fig. 4 Strain monitoring duration curves of one-set up-anchor in the downstream

条件下,天锚锚杆应变及其变化规律非常显著,表明锚杆实测轴向应变及其变化情况能够较好地反映锚杆受力特性。

从应变实测特征值统计表可见:

(1) 同一组天锚锚杆中,在相同荷载吨位情况下,2 根监测锚杆上距孔口距离相同的测点的应变实测最大值不相等,靠近钢梁中部的锚杆实测应变值要大于靠近钢梁端部的锚杆应变实测值,表明锚杆受力存在不均匀现象。例如,下游 1 组天锚锚杆中,荷载为 64 t 时,23<sup>#</sup>孔锚杆上的 S23-02(距孔口 0.3 m)和 S23-01(距孔口 1.3 m)测点的实测轴向最大应变分别为 243  $\mu\epsilon$  和 200  $\mu\epsilon$ ,22<sup>#</sup>孔锚杆上的 S22-02(距孔口 0.3 m)和 S22-01(距孔口 1.3 m)测点的实测轴向最大应变分别为 142  $\mu\epsilon$  和 98  $\mu\epsilon$ 。S23-02 比 S22-02 的实测值大 101  $\mu\epsilon$ ,S23-01 比 S22-01 的实测值大 102  $\mu\epsilon$ ,二者相差只有 1  $\mu\epsilon$ 。荷载为 72 t 时,23<sup>#</sup>孔锚杆上的 S23-02(距孔口 0.3 m)和 S23-01(距孔口 1.3 m)测点的实测轴向最大应变分别为 276  $\mu\epsilon$  和 222  $\mu\epsilon$ ,22<sup>#</sup>孔锚杆上的 S22-02(距孔口 0.3 m)和 S22-01(距孔口 1.3 m)测点的实测轴向最大应变分别为 160  $\mu\epsilon$  和 112  $\mu\epsilon$ 。S23-02 比 S22-02 的实测值大 116  $\mu\epsilon$ ,S23-01 比 S22-01 的实测值大 110  $\mu\epsilon$ ,二者相差只有 6  $\mu\epsilon$ 。

上述分析表明,在同 1 组天锚锚杆中,荷载吨位相同时,不同锚杆在距孔口相同距离的测点的实测最大应变值虽然不相等,但是实测应变变化量很接

近,64 t 和 72 t 时相差分别为 1  $\mu\epsilon$  和 6  $\mu\epsilon$ ,表明 2 根锚杆的应变变化同步性很好。

(2) 同 1 组天锚锚杆中,同一根锚杆上,相同荷载吨位时,距孔口近(0.3 m)的应变计实测应变值要大于距孔口远(1.3 m)的应变计实测应变值。例如,荷载为 64 t 时,23<sup>#</sup>孔锚杆上的 S23-02 和 S23-01 轴向实测最大应变值分别为 243  $\mu\epsilon$  和 200  $\mu\epsilon$ ;22<sup>#</sup>孔锚杆上的 S22-02 和 S22-01 轴向实测最大应变值分别为 142  $\mu\epsilon$  和 98  $\mu\epsilon$ 。荷载为 72 t 时,23<sup>#</sup>孔锚杆上的 S23-02 和 S23-01 轴向实测最大应变值分别为 276  $\mu\epsilon$  和 222  $\mu\epsilon$ ,22<sup>#</sup>孔锚杆上的 S22-02 和 S22-01 轴向实测最大应变值分别为 160  $\mu\epsilon$  和 112  $\mu\epsilon$ 。

上游 1 组天锚锚杆中,应变及其变化情况具有与下游 1 组锚杆一致的规律性。

(3) 2 组天锚锚杆在相同荷载吨位时,与锚杆孔口距离相同的测点的锚杆轴向应变实测最大应变值均不相等。例如荷载为 64 t 时,下游 23<sup>#</sup>孔锚杆上的 S23-02 测点的实测轴向最大应变值为 243  $\mu\epsilon$ ,上游 18<sup>#</sup>孔锚杆上的 S18-02 测点的实测轴向最大应变值为 297  $\mu\epsilon$ ,两者相差 54  $\mu\epsilon$ ;荷载为 72 t 时,下游 23<sup>#</sup>孔锚杆上的 S23-02 测点的实测轴向最大应变值为 276  $\mu\epsilon$ ,上游 18<sup>#</sup>孔锚杆上的 S18-02 测点的实测轴向最大应变值为 247  $\mu\epsilon$ ,两者相差 29  $\mu\epsilon$ 。

同 1 根钢梁上,在荷载相同的情况下,不同的锚杆在距孔口距离相同时,出现应变测值不相同的原因,主要是因为监测锚杆所在的部位不同,因此,越接近钢梁的中部,其应变测值就越大,相反,越靠近钢梁的端部,应变测值就越小。

同 1 根钢梁上,在荷载相同的情况下,同 1 根锚杆在距孔口距离不同时,出现离孔口近的测点应变测值大于距孔口远的测点应变测值的原因,主要是在锚杆孔内,锚杆应力沿轴向存在损失,且损失率沿孔底方向是逐渐增大的。由于锚杆杆体在孔内部分与水泥砂浆的接触面积沿孔底是逐渐增大的,因此锚杆杆体在孔内的摩擦阻力沿孔底也相应增加,从而导致锚杆应力损失沿孔底也逐渐增大。

2 组天锚在荷载相同时,与锚杆孔口距离相同的测点的锚杆轴向应变实测最大应变值不相等,产生这种现象的原因是多方面的,第一,每个锚杆安装后的注浆密实度存在差异性,从锚杆无损检测结果可以看出,因此锚杆的受力情况也就不可能完全相同;第二,锚杆上的应变计粘贴面是人工打磨形成的,因此粘贴面的平整度也不可能完全一样,虽然在用电桥测量应变计之前,进行过平衡处理,但是由于应变计的粘贴面、粘胶均匀度和厚薄度等情况均会

存在不同程度的差异性,因此,应变计在工作中的测值必然会有差别。

从应变监测过程线可见:

(1) 在空载试验时,应变计测值在  $\pm 10 \mu\epsilon$  以内,在 10 min 的持荷时间内,测值稳定;

(2) 当 64 t 荷载开始后的短时间内(第一个矩形波的上升沿),应变计测值有两个明显的陡增过程,在这两个陡增过程中间有一个短暂的过渡过程;静载(前 10 min)和动载后(10 min)分界处,应变计测值有一个较为明显的跳变,但静载和动载时的测值均基本稳定,无明显变化;卸载开始后,应变计测值显著下降,且出现与加载开始时类似的两个变化阶段,在两个下降阶段之间,也有一个过渡过程,测值最终回到接近空载时的状态;

(3) 当 72 t 荷载开始后,应变计测值显著增加,静载阶段测值基本稳定,动载阶段测值有少许变化;卸载开始后,测值即显著下降;

(4) 72 t 与 64 t 荷载应变监测过程的相同之处在于静、动载阶段的应变计测值均有少许变化,表明静、动载时锚杆应力有所不同;所不同的是,加载和卸载(即第二个矩形波的上升沿和下降沿)瞬间,没有过渡过程出现,而是呈现出明显的矩形波特征,表明在 64 t 时,锚杆应力稍有不同。

## 4 结 论

天锚应变监测成果表明,锚杆应变具有显著的规律性,测值能够客观地反映各锚杆在各种工况下

的应变及其变化情况,测值均未超过设计报警值  $1\ 000 \mu\epsilon$ 。

(1) 同 1 组天锚中,在荷载相同的情况下,不同的锚杆在距孔口距离相同时,锚杆受力存在不均匀现象;

(2) 同 1 组天锚中,在荷载相同的情况下,同 1 根锚杆在距孔口距离不同时,离孔口近的测点应变实测值要大于距孔口远的测点应变实测值;

(3) 2 组天锚在荷载相同时,与锚杆孔口距离相同的测点的锚杆轴向应变实测最大应变值不相等,上游侧的最大应变实测值要大于下游侧的实测值;

(4) 测值满足设计要求,说明设计吨位具有一定的裕度(设计报警值为实测最大值的 3 倍),天锚是安全的。

## 参考文献:

- [1] GB/T13992—92,电阻应变计[S].
- [2] JJG1046—94,金属电阻应变计的工作特性[S].
- [3] 马良理. 应变电测与传感技术[M]. 北京:中国计量出版社,1993:1—20.
- [4] 尹福炎. 电阻应变计的由来、发展及展望[J]. 传感器世界,1998,(8):27—32.
- [5] 戴娟,汪大鹏,陈蕾,等. 电测应变实验中应变片的粘贴技巧[J]. 湖南工程学院学报,2003,9(13):55—57.

(编辑:王 慰)

# Research on Strain Monitoring Experiment about Up-anchors of Underground Powerhouse of TGP Based on Electrical Measuring Method

HUANG Xiang<sup>1</sup>, RAO Zhi-qiang<sup>2</sup>, NING Jing<sup>1</sup>

(1. Research Center on Water Engineering Safety and Disaster Prevention,

Yangtze River Scientific Research Institute, Wuhan 430010, China;

2. Wenhua College, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** The electrical measuring method is one of the methods to use for structural element's stress analysis in engineering. It's applied widely for its sizes is small, and measurement operation flexible, and accuracy high. The up-anchors of underground power house of TGP are important facilities used as the handing of a tower crane, so it must be examined in safety by loading experiment before using in production. All together, the stress and its change of up-anchors are monitored during the loading experiment. The achievements show that regularities are significant by real measurement using resistance strain gauges. The measured values are all in the allowable range. It shows that the up-anchors are safety.

**Key words:** electrical measuring method; underground powerhouse; up-anchor; load; strain; monitor