

# 预应力锚索在单桩竖向静载试验中的应用

和志强

(云南衡度工程检测有限公司,云南昆明 650032)

**摘要:**在狭窄场地上进行大吨位单桩竖向静载试验时,需要解决的问题是在试验设备受场地限制无法增加的情况下如何提供足够大的反力荷载。根据此次试验场地地层中基岩埋藏丰富且深度较浅的情况,通过采用预应力锚索,进行加载反力装置设计,最终采用十字形加载反力装置,有效地解决了反力荷载不足的问题,从而为类似的试验提供了一种思路 and 选择。同时,通过对试验中出现的一些问题诸如锚固力、自由段变形等进行深入地分析和研究,提出了有关改进和完善反力装置现方案的建议。

**关键词:**预应力锚索;静载试验;抗拔试验;荷载;抗拉力;锚固力;锚固段;自由段;锁定荷载

**中图分类号:**TU473.1<sup>+</sup>6 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)08-0060-04

**Application of Pre-stressed Anchor Cable in Vertical Static Loading Test of Single Pile/HE Zhi-qiang** (Yunnan Hengdu Testing of Engineering Co., Ltd., Kunming Yunnan 650032, China)

**Abstract:** It is necessary to deal with the space limit to provide enough reaction load for large tonnage vertical static loading test on narrow sites. According to the situation of large amount of bedrock in shallow bury in testing site, pre-stressed anchor cable was applied to the design of counterforce device, and reaction load was effectively solved by crossed counterforce device at last. The paper discussed the problems in the test, such as deformation of anchoring and anchor free sections with the improving suggestion.

**Key words:** pre-stressed anchor cable; static loading test; pulling resistance test; load; stretching resistance; anchoring force; anchorage section; anchor free section; lock-in load

预应力锚索作为一种有效解决边坡加固、挡墙锚固、滑坡防治、隧道和基坑支护等工程的手段,近几十年来广泛应用在水利水电、铁路、公路和建筑地基等工程项目中,其主要原理是在完成锚索安装和注浆并达到龄期后对锚索体主动施加预应力,从而达到对介质预先施加一定的压应力,改善岩土受力状态,起到加固岩土体的目的。在昆明新飞机场航站楼前中心区的单桩竖向静载试验项目中,预应力锚索设计为抗拔锚桩,主要提供竖向静载试验所需的反力。通过对锚索施加预应力(即初始锁定荷载),不仅给试桩提供足够的反力荷载,同时减少了自由段和外锚段的拉伸变形量,能最大限度地缩短加载装置(即千斤顶)活塞的行程,为试验的顺利完成提供了可能。

## 1 工程概况

昆明新飞机场位于昆明市官渡区小哨乡与大板桥乡之间的李白冲、浑水塘一带,距昆明市约 24.50 km。新机场航站楼由北京建筑设计研究院设计。根据初步设计资料,航站楼南北长约 850.00 m,东

西宽约 1120.00 m;主楼地下 1~3 层,地上 3 层,层高 6.00 m,主体结构为钢筋混凝土框架结构,屋顶为钢结构。基本柱网 12 m × 12 m,支撑屋顶钢结构的柱距约 24 m × 26 m,建筑面积(航站楼一期)约 36 万 m<sup>2</sup>。航站楼初步设计除挖方区采用天然地基外,其余区域考虑采用桩基方案。桩基类型为人工挖孔灌注桩。航站楼前区荷载较大,最大单柱荷载接近 40000 kN,各指廊单柱荷载一般不超过 10000 kN。航站楼场地暂定整平标高 2102 m。

根据《昆明市新机场航站楼前中心区试桩技术要求》,本次单桩竖向抗压静载试验 2 根试桩为 SZ-1 和 SZ-2,桩径均为 1200 mm, C30 混凝土。其中 SZ-1 试桩桩端持力层进入 P<sub>1y</sub><sup>1</sup> 极破碎岩层,桩长为 4.0 m,设计预估单桩竖向承载力特征值为 6780 kN,现场试验最大荷载按设计预估值的 2 倍控制为 14000 kN;SZ-2 试桩桩端持力层进入 C<sub>2w</sub> 极破碎岩层,桩长为 13.0 m,设计预估单桩竖向承载力特征值为 5650 kN,现场试验最大荷载按设计预估值的 2 倍控制为 11300 kN。

收稿日期:2009-02-02

作者简介:和志强(1972-),男(纳西族),云南丽江人,云南衡度工程检测有限公司(原云南省设计院桩基检测中心)技术负责、工程师,勘察工程专业,从事建筑工程桩基检测、结构实体无损检测及施工管理工作,云南省昆明市新闻路 259 号云南省设计院五楼, hzq197204@sina.com.cn。

### 2 静载试验方案

根据设计要求,2 根单桩静载试验的最大荷载分别取 14000 和 11300 kN,如果采用传统静载试验即堆载法则很难解决堆载设备及场地狭窄等问题。但由于本场区大部分区域内都有基岩埋藏,在试桩周围按照要求布置预应力锚索,用预应力锚索作为反力装置,则解决了因荷载过大而试验困难的问题。为此按照试桩主梁及预应力锚索布置形式的不同提供了 3 种方案。

#### 2.1 十字形

即 2 根主梁安装成十字形,每根主梁的两端(与梁端有一定距离)对称安置 2 根短梁,在每根短梁两边对称布置 2 组预应力锚索,每组预应力锚索提供 1900 kN 的抗拉力,则每根主梁提供的反力约为 7600 kN,2 根约 15200 kN。具体安装如图 1 所示。

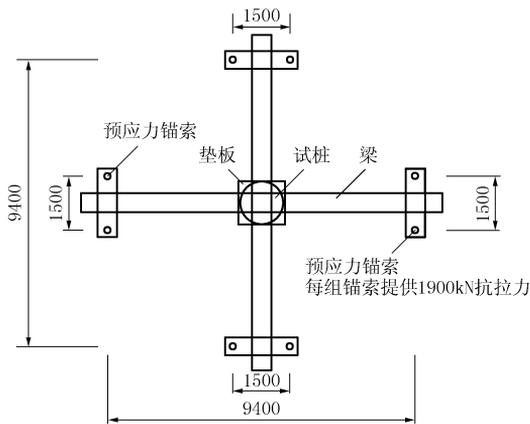


图 1 十字形预应力锚索试验装置示意图

#### 2.2 并联型

即 2 根主梁并联安装成一字形,主梁的两端(与梁端有一定距离)每边对称安置 2 根短梁,在每根短梁两边对称布置 2 组预应力锚索桩,每组预应力锚索桩提供 1900 kN 的抗拉力,则 2 根主梁每边提供的反力约为 7600 kN,两边约为 15200 kN。具体安装如图 2 所示。

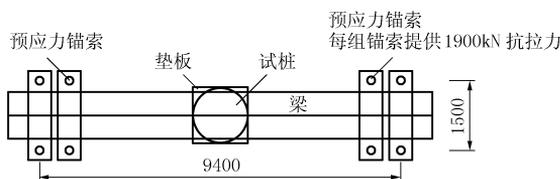


图 2 并联型预应力锚索试验装置示意图

#### 2.3 堆载法

当上述预应力锚索反力系统不能提供试验要求的反力荷载(即锚索被拔出)时,应及时采用锚桩压

重平台法或堆载法进行静载试验,压重平台装置及堆重物提前作好准备,以备用。

经过专家多次论证,最终决定采用第一种方案,主要原因是该方案在实施时各组锚索提供的反力较为平衡和稳定,而第三种方案只是作为备用方案。

#### 2.4 承重墙设计

由于静载试验的 2 根主梁每根重达 12 t,试验安装时需在主梁上放置短梁,并进行预应力锚索张拉锁定,因此主梁的平衡稳定问题十分重要,需要设置承重墙。主梁设置成十字形时需砌成四面承重墙,且高度不同,具体情况见图 3(a)、(b)。

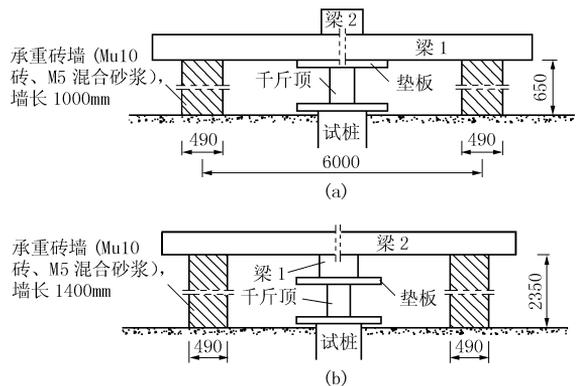


图 3 十字形主梁承重墙示意图

### 3 预应力锚索的设计

根据静载试验方案,每根试桩采用 8 根锚索,每根锚索需承担 1900 kN 抗拉力。

按以上要求,根据相关规范及地勘报告,采用  $\varnothing 130$  mm 孔径锚索。

#### 3.1 锚索设计计算

##### 3.1.1 锚索锚固体与岩层的锚固长度计算

SZ-1 试桩参考详勘报告 hxx84 钻孔:0~0.5 m 为  $Q_4^{nd}$  耕土①层,0.5~2.5 m 为  $Q_4^{el+dl}$  红粘土④<sub>1</sub>层,2.5~15.8 m 为  $P_1y^1$  中风化石灰岩⑥<sub>2</sub>层(根据文献[1],岩石与锚固体粘结强度特征值  $f_{tb}$  取 550 kPa),按构造要求,自由段取 3.5 m,锚固段设在  $P_1y^1$  中风化石灰岩⑥<sub>2</sub>层中,按文献[1]式 7.2.3 计算,锚固段长 =  $1.3 \times 1900 \div (1.33 \times \pi \times 0.13 \times 550) = 8.3$  m,取 8.5 m。

SZ-2 试桩参考详勘报告 hxx161 钻孔:0~2 m 为  $Q_4^m$  素填土②<sub>1</sub>层,2~4.5 m 为  $Q_4^{el+dl}$  红粘土④<sub>1</sub>层,4.5~10.4 m 为  $P_1y^1$  强风化石灰岩⑧<sub>2</sub>层(根据经验及文献[1],岩石与锚固体粘结强度特征值  $f_{tb}$  取 180 kPa),10.4~28 m 为  $P_1y^1$  中风化石灰岩⑧<sub>3</sub>层(根据文献[1],岩石与锚固体粘结强度特征值  $f_{tb}$

取 465 kPa),按构造要求并结合地质情况(土岩分界点),自由段取 4.5 m,锚固段设在  $P_{1y}^1$  强风化石灰岩 $\textcircled{2}$ 层及中风化石灰岩 $\textcircled{3}$ 层中,按文献[1]式 7.2.3 计算, $\textcircled{2}$ 层能提供的锚固力  $= (10.4 - 4.5) \times \pi \times 0.13 \times 1.33 \times 180 \div 1.3 = 443 \text{ kN}$ ,则 $\textcircled{2}$ 层中的锚固段长  $= (1900 - 443) \times 1.3 \div (1.33 \times \pi \times 0.13 \times 465) = 7.5 \text{ m}$ 。根据以上计算,总锚固段长为 13.4 m(5.9 m + 7.5 m),取 13.5 m。

按以上计算,SZ-1 试桩锚索长度为 14.5 m(外锚段取 2.5 m),8 孔共 116 m;SZ-2 试桩锚索长度为 20.5 m(外锚段取 2.5 m),8 孔共 164 m,锚索总长共 280 m。

### 3.1.2 配筋计算

锚索杆体采用强度为 1860 MPa 级  $7 \times \text{O}5$  钢绞线,根据文献[1]式 7.2.2,  $A_s = 1.1 \times 1.3 \times 1900 \div (0.92 \times 1860 \times 1000) = 1.59 \times 10^{-3} \text{ m}^2$ ,每根钢绞线的  $A_s$  为  $1.37 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ ,共需 12 根钢绞线。

### 3.1.3 锚索浆体与钢绞线的锚固长度计算

浆体采用 M30 水泥浆,根据文献[1]式 7.2.4,锚固长度  $= 1.1 \times 1.3 \times 1900 \div (0.72 \times 12 \times \pi \times 0.0152 \times 2950) = 2.2 \text{ m}$ 。锚索浆体与钢绞线的锚固长度满足锚固体与岩层的锚固长度的要求。

### 3.2 施工参数

(1) 锚索成孔直径  $\geq 130 \text{ mm}$ ,杆体采用强度为 1860 MPa 级  $7 \times \text{O}5$  钢绞线。

(2) 浆体材料 28 天的无侧限抗压强度  $\geq 30$

MPa,若不满足工期要求,需加入早强剂三乙醇胺。水泥采用 42.5 MPa 普通硅酸盐水泥,水灰比 0.4 ~ 0.5。

(3) 锚具、夹具须符合现行规程、规范要求。

## 4 静载试验

### 4.1 预应力锚索抗拔试验

为验证锚索的抗拔能力能否达到估算值,在 2 根试桩各配备 8 组预应力锚索的基础上各增设 1 组锚索进行竖向抗拔试验,其中 SZ-1 试桩场地增设的锚索试验桩为 SZ1-9 号(即第 9 组预应力锚索),SZ-2 试桩场地增设的锚索试验桩为 SZ2-9 号。抗拔试验结果如表 1 所列。

表 1 预应力锚索竖向抗拔试验结果

桩位 编号	桩径 /mm	桩长 /m	试验最大值		终止加载条件
			$U_{\max}/\text{kN}$	$\delta_{\max}/\text{mm}$	
SZ1-9	130	14.0	2300	23.66	达到试验要求的最大加载值
SZ2-9	130	20.5	2000	57.25	预应力锚索变形较大

试验结果表明,2 组预应力锚索试验桩的抗拔力均达到了要求,但 SZ2-9 号锚索变形量较大,经分析认为可能是该锚索自由段较长造成的,并在随后的静载试验中加强了锚索变形量观测。

### 4.2 单桩竖向抗压静载试验

试验的先后顺序为:SZ-2 试桩、SZ-1 试桩。试验结果见表 2、图 4、5。

表 2 单桩竖向抗压静载试验结果表

桩位 编号	试验最大值		残余变形 /mm	单桩极限承载力及相应沉降量		单桩承载力特征值及相应沉降量		终止加载条件
	$Q_{\max}/\text{kN}$	$s_{\max}/\text{mm}$		$Q_u/\text{kN}$	$s_u/\text{mm}$	$R_a/\text{kN}$	$s_a/\text{mm}$	
SZ-1	14000	2.59	1.80	$\geq 14000$	2.59	$\geq 7000$	1.94	达到设计要求的最大加载值
SZ-2	10170	11.39	6.28	$> 10170$	11.39	5650	2.41	预应力锚索被拔出,无法施加荷载

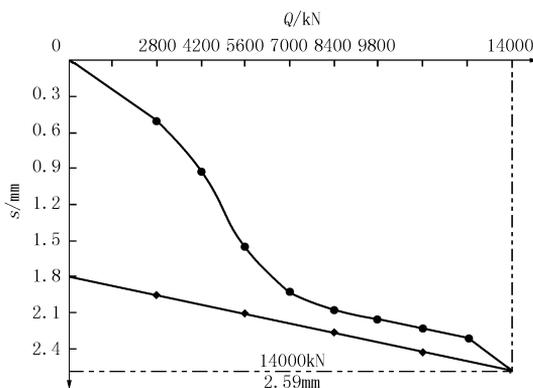


图 4 SZ-1 试桩 Q-s 曲线

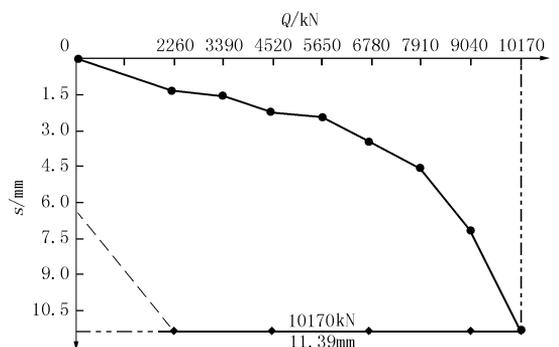


图 5 SZ-2 试桩 Q-s 曲线

SZ-2 试桩采用预应锚索反力装置法,当其试验荷载 10170 kN(第 9 级)加载完毕,准备加载

11300 kN(第 10 级)时因 8 号预应力锚索失效(被拔出)而停止。为慎重起见,随后对 SZ-1 试桩的试验方法进行了调整,即改为采用锚桩压重联合反

力装置法,压重量为2000 kN,从试验过程中观测锚索变形的情况看,该试桩的8根预应力锚索变形量均很小,最大变形量也仅为11 mm,没有出现失效的迹象,最终该试桩的最大试验荷载达到了设计要求的14000 kN。

## 5 存在的问题

笔者认为,用预应力锚索作为反力装置提供反力荷载,在静载试验的领域中是一种尝试和创新,它可以应用在基岩埋藏浅且丰富的狭窄场地上的大吨位试验,它的主要优点是施工快速、灵活和方便,同时受场地限制的影响较小,且能提供较大的抗拔力。不过根据此次试验,笔者发现了一些存在的问题,值得重视。

### 5.1 预应力锚索的锚固力问题

虽然在预应力锚索的钻孔施工过程中发现基岩埋藏深度跟地勘报告所描述的不太一致,而且据此作了增加孔深、增加锚索长度的调整,以满足锚固段长度的设计要求,同时在静载试验之前先选定2组锚索作抗拔试验,验证了其抗拔力能达到1900 kN,但在进行单桩静载试验时还是出现了SZ2-8号锚索失效被拔出的问题。由此可看出,预应力锚索的锚固力跟岩层情况、锚固段长度、水泥浆的配比、钢绞线的根数和规格、施工因素和水平等多种因素有关,尤其是在确定了施工参数后,对其最主要的影响是施工因素和水平。根据事后检查和分析,SZ2-8号孔孔深20.5 m,地下6.5 m处见基岩,基岩深度14 m,均达到规定要求,且基岩较为完整,出现锚索失效被拔出的问题主要是该孔在灌浆过程中水灰比和砂浆配比不合理,灌浆压力和时间没有达到设计要求,从而造成锚索的锚固力较低,达不到1900 kN的抗拔力。

### 5.2 锚索自由段伸长变形问题

由前面的预应力锚索设计计算可知,锚固段设置在基岩中,基岩上的土层为锚索的自由段,其中SZ-1试桩场地的岩层埋藏较浅,锚索的自由段最长不超过4.5 m,拉伸变形不明显,而SZ-2试桩场地的岩层埋藏较深,锚索最长的自由段长度达15 m,加上外锚段(即地面上的自由段)最长的有6 m多,致使锚索在静载试验时产生的拉伸变形较大,提供不了足够的反力,中间不得不重新进行张拉锁定,操作相当困难。因此今后如采用锚索作为反力装置,则需考虑到其拉伸变形对千斤顶行程的影响。

### 5.3 造价问题

用预应力锚索作为反力装置,在地形狭窄、基岩埋藏浅且丰富的场地上值得尝试,不过对该方案的最大制约是其造价相对较高,特别是在地形相对平坦的场地上作静载试验时可行性不高。

## 6 改进建议及探讨

根据几个月来的试验准备和试验过程,笔者体会最深的是,要使试验取得圆满成功,必须把握住2个关键点,即保证锚固力和缩短自由段。保证锚固力如同前面所述,在确定了锚固段、水灰比等参数后,主要是要保证施工质量,严格按设计要求进行。

至于缩短锚索自由段长度,笔者认为主要是要缩短地面上外锚段长度(因为土层中的自由段长度已固定)。由于此次试验时锚索的张拉锁定是在高达3~5 m的承重墙上进行的,不仅操作困难,锁定荷载的取值也成为一难题,如果锁定荷载较大,则承重墙无法承受,结果一部分荷载通过主梁及千斤顶传至试桩上,影响试桩的初始沉降量;如果锁定荷载较小,则在静载试验中锚索的拉伸变形增大,存在加载装置千斤顶行程超过允许范围的风险,结果是试验难以继续进行。经过多次讨论和分析,最终采用根据观测变形量进行锁定荷载修正的方法进行。

为此,试验结束后笔者经过不断地反思和研究,觉得采取以下办法进行预应力锚索反力装置的改进颇为可行:把原先放置在主梁上的短梁直接摆放在地面上,短梁与承重墙上的主梁之间用拉杆连接,其主要功能是最大限度地减少锚索外锚段(即自由段)拉伸变形,保证加载装置千斤顶行程在允许范围内。此外,由于锚索的锁定是在摆放在地面的短梁上进行,操作方便,锁定荷载也可按需要进行改变,且锁定荷载的施加不会影响试桩的初始沉降量。通过最大限度地提高锁定荷载,不仅能减少锚索长度变形量,而且能提供足够的抗拔力,为试验顺利完成提供可靠的保证。

## 参考文献:

- [1] GB 50330-2002,建筑边坡工程技术规范[S].
- [2] CECS 22: 2005,岩土锚杆(索)技术规程[S].
- [3] GB 50007-2002,建筑地基基础设计规范[S].
- [4] JGJ 106-2003/J256-2003,建筑基桩检测技术规范[S].
- [5] JGJ 94-94,建筑桩基技术规范[S].
- [6] 尚岳全,王清,蒋军,等.工程地质学[M].北京:清华大学出版社,2006.
- [7] 罗骥先.桩基工程手册[M].北京:人民交通出版社,2003.