

# 杨浦大桥主塔拉索锚固区 预应力平面设计与足尺试验

林元培 章曾焕

**摘要** 在斜拉桥拉索对称锚固构造布置的方案中,除采用拉索锚固钢横梁构造布置外,还可采用拉索锚固区预应力平面布置的设计方案。本文扼要介绍后一种布置的设计构思、构造、模型设计及测试方案

**关键词** 杨浦大桥 拉索锚固区 预应力平面设计 足尺试验

## 一、主塔拉索锚固区预应力平面布置设计的构思与构造

在各类斜拉桥中,混凝土塔已大量采用,逐步取代了早期的钢塔。现代大跨度斜拉桥,必采用密索布置,尤其是扇形索。目前拉索的发展已进入第三代。国内外拉索锚具、千斤顶、拉索的设计吨位,已达到“千吨”级的水平,已有条件减少拉索的数量。这对加快拉索安装速度、降低拉索总造价十分有利。在拉索对称锚固构造布置的方案中,除采用拉索锚固钢横梁构造布置之外,还可以采用拉索锚固区预应力平面布置的设计方案。

拉索锚固区预应力平面布置的设计及传力机理为:上塔柱拉索锚固区段,除参与主塔顺桥向、横桥向、竖向、空间的总体功能之外,还应将拉索锚固的集中力传递到主塔塔壁内。为了防止混凝土塔在拉索锚固力作用下的开裂,可采用体内有粘结的预应力钢束或体外无粘结的预应力钢束混凝土结构,把预应力作为外力来平衡拉索锚固力产生的内力。由于拉索产生于塔柱内的内力主要是沿高度分布,这样就可以采用平面预应力钢束的布置方法来抵消平面内拉索产生的内力。

以往采用的拉索锚固钢横梁方法,还存在钢横梁占用空间大,要加大主塔体体积量;钢横梁加工要求高,造价高,养护维修工作量大,空间索面构

造复杂,布置和安装困难等缺点。拉索锚固区预应力钢束平面布置方法避免了上述缺点,因而具有一定的适应性和普遍性。

除按常规进行上塔柱锚固区段的设计外,采用预应力平面布置设计方案,在设计时应考虑以下几点:

1. 保证上塔柱锚固区段预应力混凝土结构的总体安全度及足够的抗裂安全度;
2. 考虑拉索锚固和拉索张拉、施工设备、工艺要求所必需的空间位置;
3. 选用可靠的预应力锚具,建立正确和永久的预应力,重视短束的效应;
4. 若主塔混凝土施工采用泵送混凝土工艺时,建立的预应力要考虑到高标号泵送混凝土的材质、级配、浇筑、振捣、养护等特殊性质;
5. 在高塔中,所用预应力材料、管道、穿束、张拉、压浆等工艺,应确保操作安全,施工方便;
6. 保证预应力锚具的封锚可靠性,严防预应力钢丝或钢筋锈蚀;
7. 反复张拉和延迟、重复张拉的必要性;
8. 集中力的传递及相应构造特点;
9. 预应力钢束平面布置沿塔柱高度上的分布。

从总体看,上塔柱的锚固区段内,受力比较复杂。特别是拉索局部强大的集中力及预应力钢束

锚具的集中力的作用,影响结构内力、变形和应力的分布。考虑到混凝土材料的弹、塑性、非匀质性及孔洞削弱,预应力施工工艺的正常误差等一系列因素,在设计、计算中,单纯用有限元的力学模型分析,很难全面反映结构的实际工作状态和应力分布。对于斜拉桥主塔拉索锚固区段这个关键部位,还必须经过实际的考核,摸索出结构性能、构造要求、应力分布,积累施工的操作工艺经验,直接确定上塔柱拉索锚固区段的总体安全度和抗裂安全度是十分必要的。为此,最直接、有效的方法是采用足尺模型,进行模拟力学加载试验,对分析结果进行验证。

## 二、模型设计及测试方案

以上海市杨浦大桥斜拉桥工程的上塔柱拉索锚固区预应力钢束平面布置设计方案为例。

### 1. 试验模型概况

模型采用与上塔柱相同的断面尺寸。根据拉索锚固间距 1.5m 的设计构造布置及沿塔高平面受力的分析,将上塔柱实体,截取高度为 1.5m 的实体区段,放置在经过上脂处理的水磨石混凝土地坪上。模型高度为 1.5m,顺桥向长为 8m,横桥向宽为 6.5m。混凝土设计强度为 C50,采用与实桥上塔柱相同的泵送商品混凝土级配。预应力束采用  $\Phi 7$  高强度、低松弛钢丝。每 48 丝为一束,锚具选用墩头锚具。直束共 30 束(顺桥向 18 束,横桥向 12 束),弯束(交叉束)共 6 束。在同一模型中布置了不同的弯束和交叉束形式。

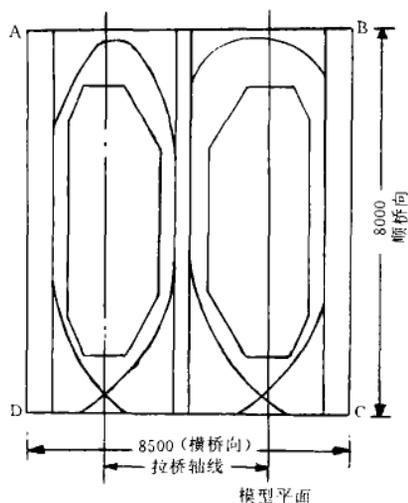


图1 模型平面

尺寸单位: mm

其中有  $R = 500\text{mm}$  的小弯头弯束;  $R = 1200\text{mm}$  的大弯头束;  $R = 400\text{mm}$  的弧形交叉束; 将三种弯束方案同时测试,以比较其受力及施工工艺特点。其钢束的平面布置,如图 1 所示。

### 2. 试验方案

加载试验方法——斜拉索承受的最大水平力为 7MN,试验用二台最大推力 10MN 的 YQL-1000 型双作用千斤顶加载,并放置在塔身内。加载装置见图 2 所示。利用千斤顶的加载来模拟拉索锚固的主要传力方向和上塔柱在平面内的主要受力状态。

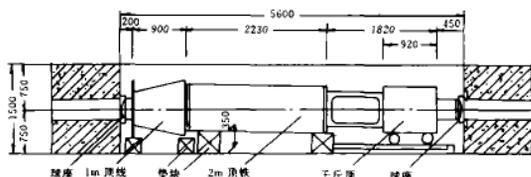


图2 加载装置(顺桥向)

尺寸单位: mm

试验的加载工况有以下三种:

- (1) 在张拉直束并压浆后,加载与卸载。
- (2) 在张拉直束并压浆后,再张拉弯束(不压浆),加载与卸载。
- (3) 在释放无压浆的弯束,割去已压浆的直束锚具后,加载与卸载。

### 3. 测点布置

为使测点布置方案更为合理,首先根据有限元法进行分析。用平面应力法及平面应变法计算的结果进行分析比较,两者十分接近,相差甚微。最后,根据平面应力法的分析及上述三次加载工况条件下可能出现的应力较高点和最不利位置,布置测点。

平面应力法分析表明:当无预应力束时,较大应力发生在端部外侧、颈部斜边承托及中部直肋处。在 5MN 顶力时,最大应力值已超过混凝土材料的极限拉应力,混凝土将开裂。

当张拉直束后,塔中部直肋处不出现拉应力,端部外侧和颈部承托处,仍然出现少量的拉应力,但结构不致于开裂。

在有预应力直束和弯束的条件下,结构不会

出现拉应力。在1.5倍设计荷载下,结构不开裂,有足够的安全度和抗裂安全度。

上述三种工况加载计算,预应力直束和弯束均按损失后最终有效预应力来分析。

根据平面应力分析的初步结果和现场条件,测点主要针对三种不同弯束的方案,布置在三个1/4区域内,具体布置的测点情况如下:

(1)在塔段中部,受力状况相对比较明确,沿顺桥向承受较大的拉力,在该区以内共设15个测点,其中上、下各3个、中截面9个,以便观测整个断面上的混凝土上应力变化情况;

(2)在塔段颈部及承托部位,该区域内截面有较大的变化,存在应力集中的现象,在三个弯束方案中,共设测点34个,以了解顺桥向应力分布情况及承托处的应力水平;

(3)在塔段两端部,在外荷加载和预应力钢束的作用下,承受很大的剪力与弯矩,孔洞削弱集中力作用,为此,根据弯矩分布,沿横桥向设置测点,并沿模型外边约45°方向设置22根应力计和21个三向应变花;

(4)在模型边缘,设置6个百分表,以测量模型沿高度方向的整体变形。

上述测点的位置和编号,见图3、4、5、6、7。

#### 4. 测试仪器

为了确保测试的精度,克服现场环境及适合较长时间的多次测试。试验选用了CYL(MF)-YB-1B型密封式钢筋应力传感器。三向应变花由内部三个标距为100mm的电阻丝应变计组成并粘贴于试件表面。

应变测量用YJ-20P智能应变仪及ASB-20转换箱。仪器测量精度为 $\pm 5\mu\omega (< 1\%)$ ,应变变化采用YTJ-22型应变花多点平衡箱。

量测仪表有相应的温度补偿记录。试验数据由自动记录仪记录,并与IBM微机连接后自动处理。

#### 5. 加载试验过程

第一次试验,仅张拉直束(压浆)后加载并卸载。混凝土采用主塔实桥泵送混凝土的原级配,加载时混凝土龄期为28天。第二次试验,直束张拉(压浆),弯束张拉(不压浆),加载并卸载。第三次试验时,弯束已放松(不压浆),直束预应力锚具已被割去(已压浆),加载并卸载。

三次加载试验时,每级荷载之间持荷时间为15min。试验时,气温在 $-5^{\circ}\text{C} \sim 10^{\circ}\text{C}$ 之间进行。

加载及卸载的试验顺序见表1。

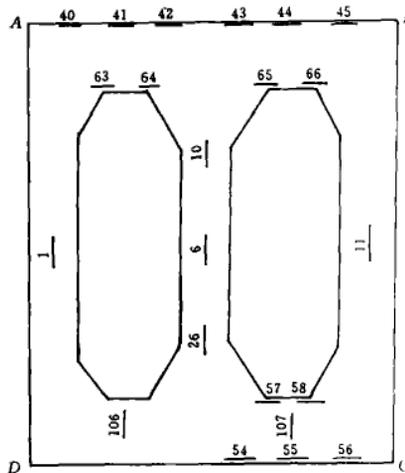


图3 上表面测点

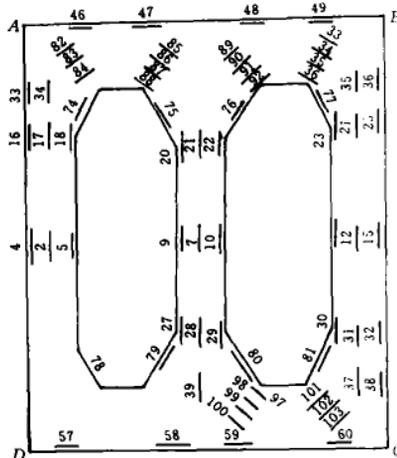


图4 中截面测点

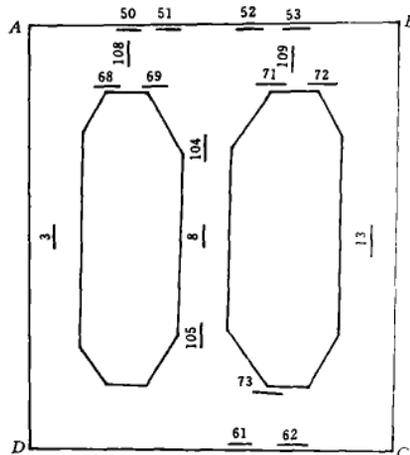


图5 下表面测点布置

