

# 北京四丰桥节段梁的体外预应力施工

简 璞 时向荣 农卫英 肖朝辉 施征南

(柳州欧维姆工程有限公司 545005)

**摘 要:** 本文以北京四丰桥1#匝道桥为例,介绍了无粘结钢绞线作为体外索在桥梁工程中的实践,以及体外索的施工要点。

**关键词:** 体外索 节段梁拼装 无粘结钢绞线 张拉 伸长量 灌浆

## 1. 工程概况

北京市四丰立交桥及其联络线工程位于北京市西四环中路丰北高架桥与丰北桥相交处,东靠丰台体育中心,北靠丰台花园,是北京市城市规划中五棵松奥运村交通枢纽的重要组成部分。其中1#匝道桥位于整个工程的东南角,连接西四环与西三环丽泽桥长途汽车站。工程由北京市市政工程设计研究总院设计,北京市市政一建设工程有限责任公司总包承建,由于该匝道预制节段梁采用悬臂拼装施工,该类施工工艺在北京市尚属首次应用,总包方专门设立了1#匝道节块拼装项目组,由柳州欧维姆公司负责体外预应力专项施工,工期3个月。

## 2. 结构形式

1#匝道桥采用预制钢筋混凝土等高T形单箱一室节段箱梁(如图1),每跨由13片节段梁拼装组成,共7跨,每跨约36米,墩顶跨与跨连接为后浇钢筋混凝土伸缩缝形式。本桥桥梁中线由缓和曲线及圆曲线组成,其中圆曲线半径 $R=403.625\text{m}$ ,桥面宽度为 $0.6\text{m}$ (防撞护栏)+ $7.25\text{m}$ (车行道)+ $0.6\text{m}$ (防撞护栏)= $8.45\text{m}$ ,全长 $254.5\text{m}$ 。荷载等级为城—A级主干道,地震烈度为8度,按9度采取抗震措施。预应力形式有体内、体外两种:体内索中底板采用 $9-7\phi 5(15.24)$ 钢绞线索,腹板采用 $12-7\phi 5(15.24)$ 钢绞线索;体外索采用的是 $15-7\phi 5(15.24)$ 无粘结钢绞线。体外索锚具型号为OVM.TT15-15SF.0体外可换式专用锚具,钢绞线标准强度为 $1860\text{MPa}$ ,体外索设计索力 $\sigma_k=0.65R_y$ ,采用先单根预紧后整体对称张拉的方案。

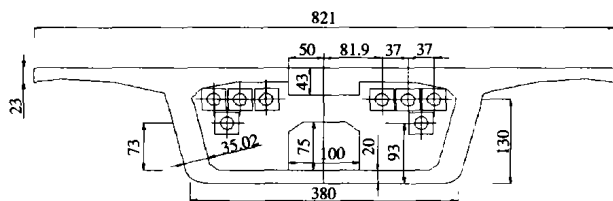


图1 节段梁标准截面图

## 3. 体外预应力结构特点

体外索预应力体系的基本组成包括以下部分:体外预应力钢绞线,包括管道和灌浆材料;体外预应力锚固系统;体外预应力的转向装置;体外预应力的防腐系统。如图2。

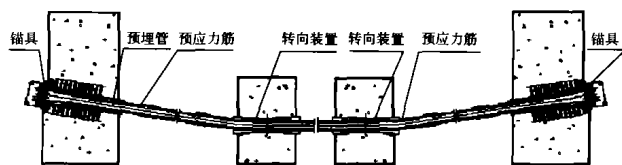


图2 体外索预应力体系示意图

体外预应力体系有众多优点:

3.1 能够方便检查钢绞线束的应力损失情况,检查腐蚀情况,保证无需拆除结构就能够更换钢绞线束。

3.2 在箱梁的壁内,不存在预应力管道,简化锚固工艺,省掉或部分省掉孔道灌浆,减少结构尺寸,减轻结构自重。

3.3 体外索通过转向装置的作用将变向力传递到结构中,简化预应力筋曲线,减少预应力摩擦阻损失。

3.4 在弯曲破坏的情况下,主梁允许产生的裂缝和形变可以较大,而确保桥梁不会坍塌,起到预警作用。

3.5 对于某些类型的结构,如预制箱梁结

构,使用体外预应力可以提高桥梁的建设速度,降低建造成本。

3.6 体外索可以用于加固或修复已建成的混凝土结构。

3.7 体外索可应用在无法内置预应力束的结构中,例如应用在钢结构或复合结构。

#### 4. 体外预应力施工

施工总流程:

施工机具准备→转向器分丝管的安装→安装钢套管与转向器之间的橡胶板→转向器与分丝管间灌浆→预制节段箱梁运至施工现场拼装→体外索下料、穿索→安装体外索锚具→(张拉体内索后)张拉体外索→锚头预埋管内灌浆→减震器的安装。

##### 4.1 施工机具的准备

将张拉的机具配套标定,辅助机具进行调试,所有机具运到工地后,进行试运行,确保正常后,即可吊至工作台面就位。

##### 4.2 转向器分丝管的安装

根据设计位置,将第6、7跨的转向器分丝管按编号对应放置,清理分丝管与孔道之间的杂物。制作适宜的橡胶条,用橡胶条把转向器与分丝管之间的两端空隙塞满,同时,调节分丝管位置,确保其与设计曲线位置相符。

##### 4.3 安装钢套管与转向器之间的橡胶板

用20mm厚的纯橡胶板割成45×15mm的橡胶条,把橡胶条塞满套管与转向器之间的空隙。

##### 4.4 转向器与分丝管之间的灌浆

###### 4.4.1 灌浆材料:

- (1) 普通硅酸盐水泥,水泥强度P.O 42.5。
- (2) UEA-12型膨胀剂。
- (3) XS-612型早强减水剂。

4.4.2 浆体在压注过程中须连续搅拌。采用合适的水灰比。

4.4.3 压浆时,从最低点的压浆孔压入,由最高点的排气孔排气和排浆,由下层往上层压浆。压浆应缓慢、均匀地进行,不得中断。

4.4.4 压浆后从检查孔抽查压浆的密实情况,如有不实,要及时处理和纠正。压浆时,

留取了试块,标准养护28天,检查其抗压强度,强度要达到设计要求。

##### 4.5 预制节段箱梁运至施工现场拼装

预制节段箱梁由桥梁厂负责制作,节段梁端块及标准段长度为3m,墩顶块为2.5m,宽度为8.21m,梁高为1.8m。采用架桥机拼装,节段梁间用环氧树脂胶涂抹粘结。

##### 4.6 体外索、锚具材料

4.6.1 体外索约32.9吨,进场时验收。验收时,对其质量证明书、包装、标志和规格等进行检查。

4.6.2 钢绞线拉伸试验符合ASTM A416-99a 1860级。

###### 4.6.3 无粘结钢绞线的外观检测:

(1) 成品拉索外表面不应有深于1mm的划痕,不应有面积大于1cm<sup>2</sup>的损伤;

(2) 成品拉索两端锚固位置的光面钢绞线表面不得有损伤;

(3) PE管的壁厚在0.8至1.2mm。

4.6.4 锚具、夹具进场时,有出厂合格证和质量证明书核查其锚固性能类别、型号、规格和数量。并按下列规定进行检查:

(1) 外观检查:从每批中抽取10%的锚具且不小于10套。

(2) 硬度检验:从每批中抽取5%的锚具且不少于5套,对其中有硬度要求的零件做硬度试验,对多孔夹片式锚具的夹片,每套至少抽取5件。

(3) 静载锚固性能试验:从同批中抽取6套锚具(夹具或连接器)组成3个预应力筋锚具组装件,进行静载锚固性能试验。

##### 4.7 体外索下料、穿索

4.7.1 在工厂内制作完成的成品索卷制成盘运抵工地就位,在0-7#墩端头放置放线架固定索盘,采用人工牵引。牵引过程中,采用可靠的保护措施防止索体表面的HDPE护套受到机械损伤。在体外索进入锚固端的预埋管之前,根据精确测量的索两端锚固的实际距离,剥除两端PE层,确保在张拉后索的PE层进入预埋管的

长度在300mm-600mm之间,用中性清洗剂清除裸露钢绞线的防腐油脂,以保证钢绞线与环氧浆的握裹力。

4.7.2 采用人工单根平行穿索,穿索完成后,检查钢绞线外包PE无破损。

#### 4.8 体外索张拉

##### 4.8.1 准备工作:

(1) 施工现场具备已批准的张拉程序和现场施工说明书;

(2) 现场由具备预应力施工专业技术的施工人员来操作设备;

(3) 张拉机具设备与锚具配套使用,根据体外索的类型选用YDC240Q千斤顶、YCW400B千斤顶及ZB4/500电动油泵。

(4) 将预埋管端部的密封装置及锚头内密封筒,锚垫板安装好。

(5) 施加体内预应力的同时,分别在体外索两端装上工作锚板及夹片。YDC240Q千斤顶安装就位,进行单根预紧,预紧控制应力为总控制应力的5%。预紧完毕,安装YCW400B千斤顶,上好工具锚。工作锚板、千斤顶、工具锚安装要同轴紧贴,张拉面要平整,待转向器内水泥浆达到80%M40,体内索张拉完毕后,进行体外索张拉。

(6) 施工现场确保全体操作人员和设备安全。

##### 4.8.2 整体张拉

利用YCW400B千斤顶进行整体张拉。在张拉到位后,拆除千斤顶,旋紧专用压板的螺母,压紧夹片。(如图3)

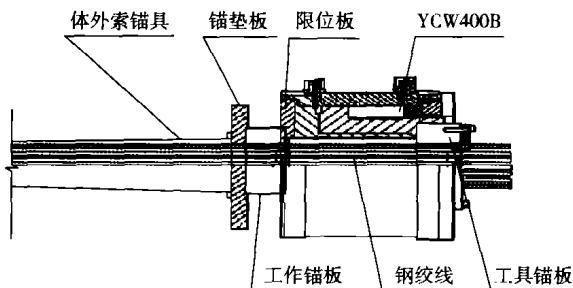


图3

##### 4.8.3 张拉应力的控制:

(1) 体外索的张拉控制应力符合设计要求。施工中体外索需要计入锚圈口预应力损失,张拉控制应力比设计要求超张拉了3%。

(2) 体外索采用应力控制方法张拉,以伸长值进行校核,实际伸长值与理论伸长值的差值符合设计要求,实际伸长值与理论伸长值的差值均控制在-5%~+10%以内。

(3) 体外索的理论伸长值 $\Delta L$ (mm)可按下式计算:

$$\Delta L = \frac{P_p L}{A_p E_p} \left( \frac{1 - e^{-(kx + \mu\theta)}}{kx + \mu\theta} \right)$$

式中:

$P_p$ —体外索的平均张拉力(KN);

$L$ —从张拉端至计算截面(中跨跨中截面)的孔道长度(m)

$A_p$ —体外索的截面面积(mm<sup>2</sup>);

$E_p$ —体外索的弹性模量

$K$ —每米孔道局部偏差对摩擦影响系数( $K$ 取0.0015)

$\mu$ —预应力索与孔道壁之间的摩擦系数

$\theta$ —从张拉端至计算截面(中跨跨中截面)曲线孔道部分切线夹角之和(rad)

(4) 摩擦阻试验数据:(见表1)

表1

束号	设计值			实测值			摩擦系数(反算) $\mu$
	设计张拉值 $N_s$ (kN)	体外索长度 $X$ (m)	累计转角 $\theta$ (rad)	主动端张拉力 $N_s$ (kN)	被动端张拉力 $N_b$ (kN)	摩擦阻损失 $N_0=N_s-N_b$ (kN)	
N2 (北端)	2493	34.822	0.5247	(2333+ 2364)/2 =2348.5	(2138+ 2123)/2 =2130.5	218.0	0.086
N3 (北端)	2493	34.888	0.8413	(2364+ 2371)/2 =2367.5	(2123+ 2138)/2 =2130.5	237.0	0.063
N4 (北端)	2493	34.803	0.3699	(2121+ 2417)/2 =2269.0	(1881+ 2200)/2 =2040.5	228.5	0.146

伸长值计算见表2

表2

钢束编号	钢绞线孔道长度(m)	角度 $\theta$ (rad)	计算伸长量 (mm)	伸长量下限 (-5%)	伸长量上限 (+10%)	备注
Ny2	35.322	0.524746	208.6	198.2	229.5	不含两端千斤顶的工作长度计0.8m的伸长值 $\Delta L_{顶}=10\text{mm}$
Ny3	35.388	0.841303	208.2	197.8	229.0	不含两端千斤顶的工作长度计0.8m的伸长值 $\Delta L_{顶}=10\text{mm}$
Ny4	35.303	0.369917	207.6	197.2	228.4	不含两端千斤顶的工作长度计0.8m的伸长值 $\Delta L_{顶}=10\text{mm}$

注：伸长值的测量标记从 $0.1\sigma_k$ 开始。

实际伸长值为：

$(0.1\sigma_k \rightarrow \sigma_k)$  伸长值 +  $(0.1\sigma_k \rightarrow 0.2\sigma_k)$

伸长值 - 夹片内缩量

(5) 体外索张拉时，初应力设为 $10\% \delta_{con}$ ，伸长值从初应力时开始测量。索的实际伸长值除了测量的伸长值外，必须加上初应力以下的推算伸长值。对后张法构件，在张拉过程中产生的弹性压缩值一般可省略。

体外索张拉的实际伸长值 $\Delta L$  (mm) 可按下式计算：

$$\Delta L = \Delta L_1 + \Delta L_2 - L_3$$

式中： $\Delta L_1$ —从初应力至最大张拉应力间的实测伸长值 (mm)；

$\Delta L_2$ —初应力以下的推算伸长值，可采用相邻级的伸长值

$L_3$ —夹片回缩量(mm)

#### 4.8.4 锚头封锚

(1) 切除两端多余钢绞线，钢绞线长出锚板端面的长度东边为40cm，西边为50cm，以便于以后换索放张。禁止采用气割和电弧切割。

(2) 安装防松装置。

#### 4.9 锚头预埋管内灌环氧树脂

4.9.1 压浆前，先对孔道进行清洁处理。

(1) 灌浆材料：

环氧树脂 (E-44)，稀释剂 (二甲苯)，固化剂 (乙二胺)，水泥 (P.O 42.5)。

(2) 环氧浆按适当的配比施配。

(3) 冬季施工，采用低温固化剂。

4.9.2 压浆时，从最低点的压浆孔压入，由最高点的排气孔排气。压浆缓慢、均匀地进行，不得中断。当排气孔冒出跟进浆孔相同浓度的环氧浆体时，停止灌浆，保压1分钟压力后封堵灌浆管。

4.9.3 压浆后从检查孔抽查压浆的密实情况。

#### 4.10 安装减震装置

4.10.1 全桥安装了2128个减震器套管，112个减震器。

4.10.2 安装减震橡胶

4.10.3 安装保护罩

全桥共安装84个保护罩，保护罩内灌油脂，油脂完全包裹外露钢绞线。



图4 四丰桥1#匝道全景

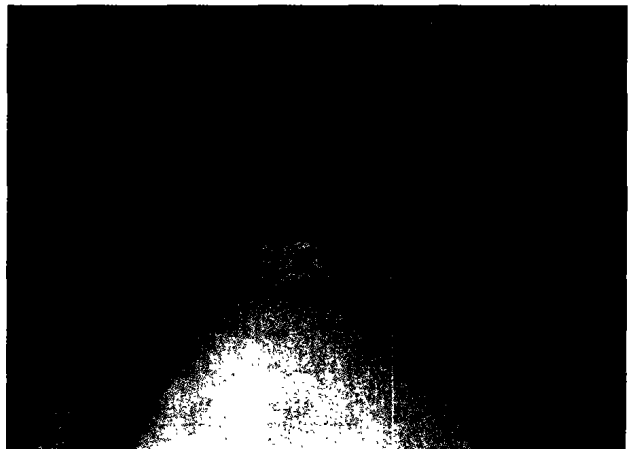


图5 张拉后箱梁内索体

(下转第40页)

### 3.3 斜张桥

#### 1. 台北市重阳大桥 (图22)

重阳大桥横跨淡水河,主桥采用跨径 $92.5+200+92.5=385\text{m}$ 之三孔连续斜张桥,由钢土梁、钢筋混凝土桥塔及斜张钢索组合而成之复合式结构,H型桥塔高约72公尺,双面钢索由土塔沿桥轴方向扇形展开。本桥于1989年完工,为台湾首座钢斜张桥<sup>[2]</sup>。

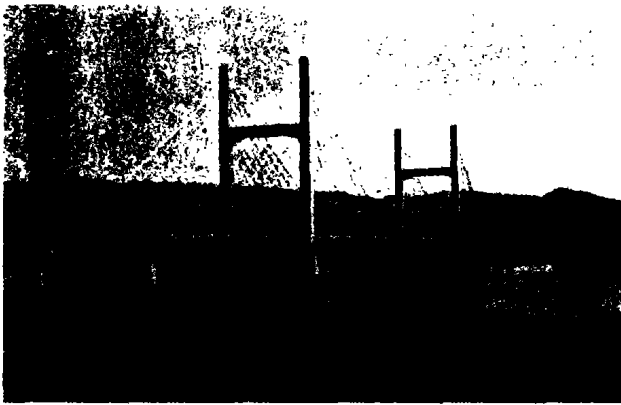


图22 台北市重阳大桥

#### 2. 南二高高屏溪斜张桥 (图23)

台湾南部第二高速公路高屏溪斜张桥为单

桥塔非对称复合式斜张桥,全长510公尺,主跨330公尺为钢结构,边跨180公尺为预应力混凝土结构,桥塔高183.5公尺,斜张钢索沿桥梁中心成单面混合扇形配置。主跨之箱型钢梁采用全断面工地焊接,钢床板铺面采用Guss Asphalt系统。本桥为目前台湾跨径最长之斜张桥,于1999年12月完工通车,由于应用多项新施工技术,挑战性高,成为台湾提升造桥技术的新里程碑<sup>[12]</sup>。

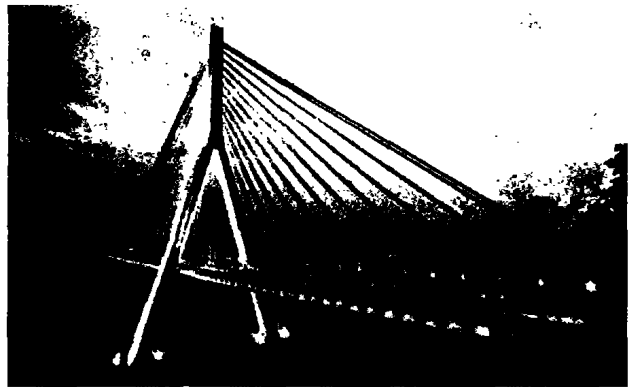


图23 南二高高屏溪斜张桥

(下期待续)

(上接第20页)

### 5. 施工质量

5.1 本工程体外索根数多、工期紧凑且工艺复杂。因此,在下料、运输、穿索以及张拉过程中均按照相应的施工工艺严格进行操作。

5.2 在施工过程中要认真记录各项技术参数。

5.3 为确保防止质量事故,在施工过程中还须对关键工序进行必要的监督检查。

5.4 每一道工序结束后,经质检员和监理工程师认可后方可进行下一道工序。

5.5 施工严格按照设计图纸及有关国家规范进行。

### 6. 结束语

6.1 由于采用体外预应力,减轻了结构的自重,降低了结构整体的造价。特别是在预制箱梁施工现场只需要将预制好的箱梁节段在临时

支架上组拼成桥,提高了施工速度,降低了施工费用。

6.2 无粘结钢绞线体外索采用两层防腐,即钢绞线专用防腐油脂、外包PE管,防腐效果好。

6.4 体外索全部满足设计规范及相关强制性国家和行业标准的规定和国家有关施工规范的技术要求,满足招标文件及设计文件规定的技术要求、施工要求。

### 参考文献

- 1、《北京四丰立交匝道及其联络线1#匝道桥设计图纸》北京市市政工程设计研究总院设计
- 2、《公路桥涵施工技术规范》交通部第一公路工程公司人民交通出版社
- 3、《新型预应力材料及体系》,柳州市建筑机械总厂