

预应力技术在宁波外滩大桥工程中的运用

张俊杰 马 磊

(上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司 上海市 200092)

摘 要:宁波外滩大桥主桥采用主跨225m的独塔四索面异型斜拉桥结构,引桥采用预应力混凝土连续梁结构。本文着重介绍了外滩大桥主桥斜拉索及锚固体系、后锚点预应力及吊杆锚固体系、塔墩钢-砼连接节点、引桥预应力砼连续箱梁设计、索塔转体提升施工过程预应力张拉控制等预应力工程技术运用,对类似工程具有一定的参考价值。

关键词:外滩大桥 自锚斜拉桥 预应力 预应力锚固

1 引言

预应力技术历经半个多世纪的发展,已在土木工程建设中得到广泛应用。在桥梁工程中,不论是特大跨径的悬索桥、斜拉桥,还是大中跨度的系杆拱桥、连续梁桥、刚构桥及小跨度的简支梁桥、板桥,都可有效地应用预应力技术;在混凝土工程中应用预应力技术,构建预应力混凝土构件,使其产生的预应力用来削弱外荷载所引起的拉应力作用,也就是借助混凝土抗压强度高的特点来弥补其抗拉强度低的不足,进一步推迟受拉区混凝土开裂。由于预应力技术的应用不仅能够节省结构物的施工材料,并减轻其自重、增强其结构的抗渗能力和抗裂水平、降低其结构主拉应力和竖向剪力、提高其结构刚度,而且同时还具有施工工艺便捷、结构形式简单、设计安全可靠等特点,因此预应力技术在道路桥梁结构物的建设中,对于增强道路桥梁的承载能力和耐久性等方面,都有着非比寻常的重要意义。不言而喻,预应力材料的耐久性更是桥梁结构安全可靠的保障。

宁波外滩大桥主桥采用独塔四索面异型斜拉桥(外滩大桥实景图如图1所示),除了斜拉索外,在索塔与主墩钢砼固结节点以及索塔后锚点锚固构造中均应用了预应力技术。而且在三角型索塔施工工艺中也大量运用预应力钢绞线实现塔柱的转体和提升。另外,在两岸引桥采用预应力砼连续梁结构。外滩大桥预应力运用形式丰富,并注重耐久性设计,在该工程中起到了关键性作用,值得类似工程借鉴。



图1 外滩大桥实景

2 预应力技术的运用

宁波外滩大桥位于市中心的核心地带——三江口附近,甬江大桥下游1km左右的甬江上,该段江面宽250~300m。与桥址区甬江主航道偏向西岸侧对应,外滩大桥主桥采用独塔四索面异型斜拉桥结构,全钢结构,跨径布置自西向东为主跨225m+边跨82m+30m=337m。甬江中靠东侧浅滩处设一主墩,与索塔固结,边墩均在岸上。充分考虑到与甬江航道的不对称性相协调,主塔向江东侧倾斜,并用一根强大的钢质拉杆从甬江东岸拉住,拉杆与主塔、水平杆构成稳定而醒目的三角形体系,通过斜拉索悬吊起整个桥体,给人以强大的震撼力。桥塔倾斜成“人”字形,寓指人文的宁波,着重表达宁波搏击风雨、勇往直前、具有海洋般宽阔胸襟的现代化花园城市形象。另外,主梁两侧向下悬挑伸出曲线的人行桥,宛如海鸥羽翼,简洁而轻灵。人行桥下端直接延伸到江边的休闲公园里,使桥梁与两岸景观的衔接恰到好处。外滩大桥全长1040.74m。主桥为分离式双箱断面,单幅标准桥宽21.4m,双向六车道,并通行非机动车道和行人。引桥采用预应力砼箱梁结构,标准断面全宽33m。设计车速:50km/h,设计荷载:城-A级。

索塔采用三角形斜塔结构,向江东侧倾斜,位于主梁中间。前塔柱从塔头分出两肢倾斜向下

延伸,在桥面处与主梁固结,通过主梁后,竖直向下与主墩固结。水平杆连接前塔柱下端和后斜杆尾端,后斜杆与前塔柱相交于塔头,锚固于边跨主梁间的横梁上,将塔头强大的拉索拉力转化为边跨主梁轴向压力(见图2)。后斜杆穿过横梁后,向下延伸与两水平杆相交于后锚点。

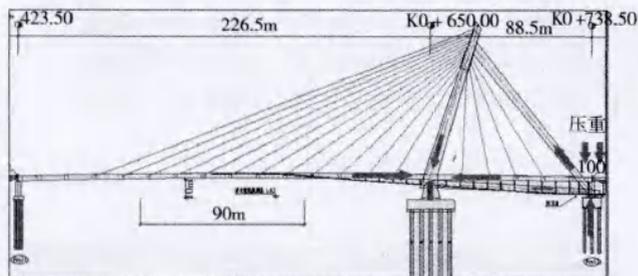


图2 外滩大桥三角形索塔轴力分解示意图

在结构受力体系中,梁和塔融为一体,前塔柱、后斜杆和边跨主梁形成主要的受力封闭三角形体系。主跨主梁强大的轴向压力在塔梁固结点处与边跨主梁的轴向压力(由固结于边跨主梁横梁间的后斜杆传递)以及前塔柱轴向压力的水平分力平衡。三角形斜塔体系中的水平杆仅传递很小的轴向压力。前塔柱没有不平衡剪力导致的弯矩作用于主墩,从而大大降低了主墩的恒载弯矩。

2.1 主桥斜拉索锚固体系

外滩大桥主桥共64根斜拉索,梁上标准索距为15m,为空间四索面。根据拉索锚固的位置,分为内侧索和外侧索。根据索力的不同,拉索采用PES7-73~283共计8种规格。索塔、索梁锚固系统除了0#索以及边跨外侧1~4#索塔上锚固采用外挂耳板外,其余均采用钢锚箱锚固形式集中锚固于上塔头内部。在满足制作加工、张拉空间等工艺要求的前提下,通过构造细节上的处理确保了结构的安全可靠。锚具采用冷铸锚。拉索最大规格为PES7-283,最长约224m,单根最大重量为19.3t。

斜拉索采用高强度镀锌平行钢丝索股,钢丝强度1670MPa,拉索及其冷铸锚需满足《斜拉桥热挤聚乙烯高强钢丝拉索技术条件》(GB/T18365-2001)的相关要求。拉索护套为黑色内层彩色外层双层结构(C型),材料应符合《建筑缆索用高密度聚乙烯塑料》(CJ/T3078-1998)的相关要求,且其耐环境应力开裂指标应满足F0大于等于3000h的要求。

为防止拉索锚固端的锈蚀,全桥布设除湿机

共4台,确保主梁风嘴、横梁以及上塔头等拉索锚固区均在除湿覆盖范围内,同时在构造空间设计充分考虑后期检修运营期间的检修空间及可达到要求。

2.2 后锚点预应力及吊杆锚固体系

后锚点为索塔后斜杆、两水平杆以及边跨主梁间横梁的交汇区段,是大桥的生命线。后锚点下承台顶设有承压纵向滑动盆式支座,规格为GPZ(II)22.5DX。为确保支座始终处于受压状态,须设置压重平衡支座处各荷载工况竖向向拉力。

(1) 受压重填芯砣有效空间限制,边跨桥梁部分箱室及连接横梁、部分后斜杆以及后锚点内的砣压重仅能平衡恒载产生的上拔力;

(2) 活载及温度等其它荷载产生的上拔力则通过设置预应力锚固的后锚点承台自重来平衡。

在后锚点处通过设置6根PES7-109平行钢丝吊杆,一端采用耳板锚固在锚碇承台上,一端采用冷铸锚张拉端锚固在后斜杆两侧的横梁上。单根锚固吊杆拉力为2500kN,6根共计15000kN,保证在支座处的总压力与活载等可变荷载产生的最大拉力相平衡。后锚点下承台平面尺寸为9.6m×9.6m,厚7.5m。锚固耳板采用环氧预应力钢束锚固在承台内,横梁上吊杆锚固端承压面采用球面构造以适应温度等引起的结构变形。吊杆可进行单根更换。吊杆及预应力张拉端锚具均采用保护罩防护,防护罩内填充斜拉索锚具专用防腐建筑脂。

吊杆耳板预应力锚固原理及计算如下:

耳板预埋入砣承台中,采用预应力锚固耳板,平衡吊杆的拉力,确保耳板与砣连接之间不产生拉力(见图3)。

单根吊杆索力 $F=2500\text{kN}$,吊杆索力全部由钢绞线承担,采用4根钢绞线均匀锚固,取有效预应力系数0.5,安全系数1.4,则单根钢绞线面积为 9.4cm^2 ,采用 $\phi^{*}15.20-7$ 规格钢绞线。

2.3 塔墩钢砣连接构造

外滩大桥塔墩连接采用钢—砣固定连接(见图4),构造采用剪力钉+预应力锚固方式。前塔柱塔底承压底板下侧面设置剪力钉与主墩砣连接。剪力钉采用 $\phi 22 \times 200$ 的圆柱头焊钉,间距200mm。承压底板塔内侧设井字型加劲,并填充砣,将塔壁强大的轴力均匀过渡到与砣面接触的

承压底板。为确保钢砧接触面的密贴,加强连接性能,工程采用施加预应力体系的方式,沿塔底周边布置 $\phi^s15.20-7$ 环氧预应力钢绞线锚固。

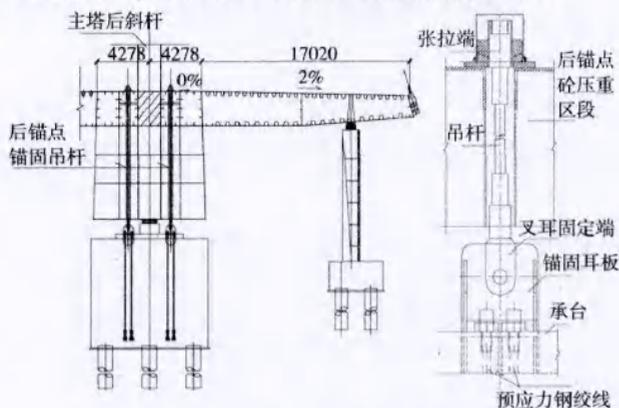


图3 后锚点预应力锚固图

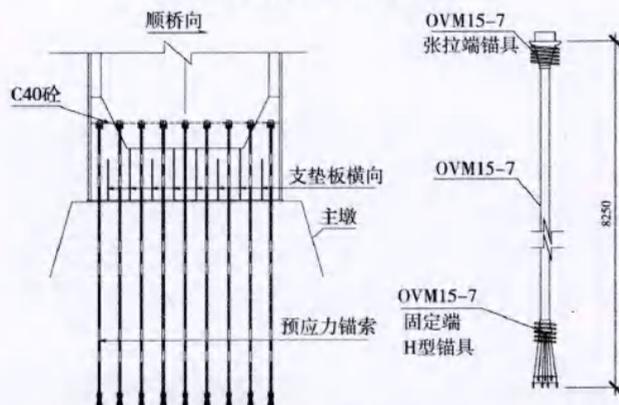


图4 塔墩钢-砧连接预应力锚固图

2.4 引桥预应力砧连续箱梁设计

外滩大桥两岸引桥采用与主桥主梁外形一致的预应力砧连续箱梁,建筑造型风格一致,简洁轻盈。引桥结合横向交叉道路设置情况进行跨径布置:在交叉口处均采用一跨跨越横向下穿道路;跨径布置尽可能统一,减少跨径种类,方便设计和施工。按上述原则,外滩大桥引桥跨径布置为:

西岸引桥: $(3 \times 25\text{m}) + [24\text{m} + 38.5\text{m} (\text{人民路下穿}) + 22.5\text{m}] + (25.5 + 27\text{m}) + [31\text{m} + 36\text{m} (\text{中马路下穿}) + 32\text{m}] = 311.5\text{m}$;

东岸引桥: $[22\text{m} + 25\text{m} + 35\text{m} (\text{滨江大道下穿}) + 25\text{m}] + (3 \times 21.8\text{m}) + [24.5\text{m} + 38\text{m} (\text{江东北路下穿}) + 22.5\text{m}] + (26\text{m} + 4 \times 27\text{m}) = 391.4\text{m}$;

上部结构单幅桥采用预应力单箱四室连续箱梁,按预应力A类构件设计。为保持箱梁外型的统一,梁高均采用1.7m,箱梁顶板宽16.0m,厚0.20m;底板水平投影宽15.94m,厚0.2m,支点附近渐变至0.4m;腹板厚0.4m,支点附近渐变至

0.6m;中横梁宽2.2m,端横梁除西岸北侧桥台处宽1.45m以外,其余均为1.2m;采用支架现浇施工。

根据箱梁构造以及计算分析,腹板束采用 $\phi^s15.20-12$ 钢绞线,每道腹板设置单排预应力束,沿各腹板中心线位置布置;顶、底板束采用 $\phi^s15.20-7$ 钢绞线,沿顶、底板厚度中心布置;西岸北侧桥台处端横梁布置4束 $\phi^s15.20-15$,其余端横梁布置3束 $\phi^s15.20-12$ 或2束 $\phi^s15.20-12+1$ 束 $\phi^s15.20-15$ 钢绞线,分两排布置;中横梁布置6或7束 $\phi^s15.20-12$ 钢绞线,单排布置。预应力钢绞线指标为 23.75kg/m^2 。

预应力管道采用塑料波纹管,压浆采用真空辅助压浆工艺,并对浆液的材料、泌水率、稠度等作出了明确的规定,确保压浆做到饱满、密实。

该工程预应力钢绞线材料均采用270级 $\phi^j15.20$ 高强度低松弛钢绞线(主桥塔墩锚固、后锚点吊杆锚固采用环氧钢绞线),技术条件满足《预应力混凝土用钢绞线》。预应力锚具采用I类优质群锚体系。

2.5 索塔转体提升施工过程预应力计算机同步张拉控制技术

由于外滩大桥主桥索塔采用异型的三角形结构,因此,其施工方法不同于常规。索塔施工时,水平杆采用支架法施工,用龙门吊机吊运就位,前塔柱采用“竖拼竖转”法施工,后斜杆采用“先卧拼后整体提升”法施工。

前塔柱利用设置在主墩处的提升塔架逐段进行竖直拼装,然后利用两岸设置的前拉索、后背索及液压同步张拉控制系统进行前塔柱竖转到位。后斜杆先在支架卧拼,然后同步控制前塔柱顶设置的提升机构及后斜杆尾端的滑移小车实现后斜杆就位。竖转及提升均采用预应力钢绞线计算机液压同步控制技术来实现。

前塔柱共重1700t,根据前塔柱的结构特点,前拉索锚固在B7钢箱梁节段间的临时横梁上,共2束 $19\phi^s15.20$ 钢绞线;后背索锚固在对岸引桥桥墩承台上,利用2个边墩及2个中墩承台作为锚点,边墩及中墩分别布置15根、23根 $\phi^s15.20$ 钢绞线,共4束。为确保引桥边墩的受力安全,采用前后承台间设砧系梁连接,形成框架整体结构增强水平抗推刚度。塔柱竖转时,利用计算机液压同步控制系统进行同步下放就位。(下转第31页)

$$F_l \leq (0.7\beta_h f_t + 0.25\sigma_{pc,m})\eta u_m h_0 \quad (5)$$

公式中的系数 η 按下列两个公式计算, 并取其中较小值:

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} \quad (6)$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} \quad (7)$$

墙厚900mm时, 按照公式(5)、(6)、(7)对主梁、竖向斜撑及水平撑杆埋件进行抗冲切验算。验算结果如下:

主梁、斜撑处埋件抗冲切验算:

$$U_m = (750+500) \times 2 + (900+500) \times 2 = 5300\text{mm}$$

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} = 0.4 + \frac{1.2}{2} = 1$$

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} = 0.5 + \frac{20 \times 500}{4 \times 5300} = 0.97$$

$$F = (0.7 \times 1.71 + 0) \times 0.97 \times 5300 \times 500 = 3077\text{kN} > F_l = 2375\text{kN}, \text{ 满足要求。}$$

水平撑处埋件抗冲切验算:

$$U_m = (390+500) \times 2 + (390+500) \times 2 = 2390\text{mm}$$

$$\eta_1 = 0.4 + \frac{1.2}{\beta_s} = 0.4 + \frac{1.2}{2} = 1$$

(上接第13页)

后斜杆整体提升、滑移前, 先在前塔柱顶设置钢绞线计算机液提升系统, 然后进行后斜杆尾端平移小车安装。在提升过程中, 通过调整前塔柱前拉索、后背索索力实现塔顶位置控制。后斜杆正式提升时, 同步控制前端两提升吊点索力及位移、尾端滑移牵引系统与前端提升吊点的配合, 保证提升钢束始终处于垂直提升状态(见图5)。



图5 前塔柱竖转和后斜杆整体提升施工

3 结语

外滩大桥采用独塔四索面的异型斜拉桥结

$$\eta_2 = 0.5 + \frac{\alpha_s h_0}{4u_m} = 0.5 + \frac{20 \times 500}{4 \times 2390} = 1.55$$

$$F = (0.7 \times 1.71 + 0) \times 1 \times 2390 \times 500 = 1430\text{kN} > F_l = 561\text{kN}, \text{ 满足要求。}$$

通过以上抗冲切验算结果可看出, 主梁、竖向斜撑及水平撑杆埋件在荷载作用下均满足强度要求。

4 结语

(1) 本文以现代城外爬塔吊支承架为研究对象, 考虑支承架结构竖向荷载的不均匀分配及塔吊吊臂方位对支承架结构受力的影响进行支承架结构的设计计算。

(2) 通过支承架结构的设计发现, 节点的设计非常关键, 严格按照“强节点, 弱构件”进行节点设计, 节点的强度是否满足要求, 是保证支撑结构安全的关键。

(3) 对支承架进行预应力张拉, 使埋件节点设计更为合理, 强度满足要求。避免附着混凝土墙体的开裂, 以免造成不必要的损失。

参考文献

- [1] 周明, 郭彦林, 王小安. 广州珠江新城西塔塔吊支承架结构承载力研究[J]. 施工技术, 2008, 37, (5).
- [2] 郭彦林, 董全利. 倾斜高层建筑施工关键问题及实施[J]. 施工技术, 2006, 35 (12).
- [3] GB50010-2010, 混凝土结构设计规范[S].

构, 在构造关键节点成功运用预应力技术, 经济合理地实现了其作为宁波中心城核心区景观桥梁的建筑造型。该工程预应力的应用形式多样, 各具特色。塔墩钢混固结点以及后锚点采用预应力锚固于承台的吊杆等构造简洁, 耐久可靠, 后期养护均在外表面, 十分方便。引桥预应力砼大箱梁采用与主梁外形一致的截面形式, 结构轻盈美观, 整座大桥风格一致, 与周边环境协调。集中锚固的斜拉索凸显张力, 很好地表达了大桥的寓意。三角型索塔采用预应力计算机液压同步张拉控制技术, 成功实现了主塔竖转、后斜杆提升等关键工序。外滩大桥建设总工期两年半, 于2010年年底竣工通车, 为改善宁波中心城区的交通发挥了重大作用。

参考文献

- [1] 马磊, 葛竞辉, 张俊杰. 宁波市外滩大桥设计《2011年全国桥梁学术会议论文集》2011年10月。
- [2] 张俊杰, 马口. 宁波市外滩大桥后锚点设计与研究《城市道桥与防洪》2012年10月。
- [3] 全军, 廖德川, 鄢伟. 宁波市外滩大桥前塔柱“竖拼竖转”施工技术《2011年全国桥梁学术会议论文集》2011年10月。