文章编号：1009－7767(2004)06－0331－04

体外预应力在天津城市高架桥中的应用

史伟明[1]，马泽军[1]，董建民[2]

（1. 天津市政工程局 天津 300050；2. 天津城建集团二公司 天津 300161）

摘 要：天津市中心城区快速路东南半环高架桥工程中首次设计应用了体外预应力体系。文中以该桥的施工为背景，介绍了体外预应力体系施工技术在工程中的应用，并力求通过该工程的施工，摸索出体外预应力施工工艺的流程及施工控制重点，找出体外预应力的作用和特点，并通过对箱梁混凝土的应力及应变的检测，证明了该施工工艺的可行性，为该工艺的推广提供了技术储备并奠定了基础。

关键词：高架桥；体外预应力；体系；成品束

中图分类号：U448.35 **文献标识码**：B

Application of External Prestress for Viaduct in Tianjin

SHI Wei-ming[1]， MA Ze-jun[1]， DONG Jian-min[2]

同体内预应力一样，体外预应力也是很早便用于桥梁建造，尤其是在国外。只是由于当时体外索防腐蚀问题尚未很好解决，再加上体内预应力结构的优点被充分强调而得到大量应用，导致体外预应力技术的发展滞后。直到上世纪70年代，随着斜拉桥的大量兴建，防腐技术的不断发展，以及人们对体内预应力“自然防腐”效果的重新认识，使体外预应力技术得以重新焕发生机。

在连续梁桥中采用体外预应力，因其体外索及其管道位置不占用梁体截面，因此在设计上可以减少桥梁结构的厚度，进而减轻桥梁自重，提高结构的整体承载能力。同时，由于体外预应力设计为可更换索，较体内预应力可以延长桥梁的使用寿命；又由于这种设计不受桥梁结构限制可以进行大股集中布束，从而提高了预应力效率；此外，体外预应力在施工过程中不需注浆，进而简化了施工工序，提高了工程质量。

在天津市中心城区快速路东南半环高架桥工程中，首次在预应力混凝土连续箱梁桥设计中采用了体外索预应力技术，使体外与体内预应力相结合，有效地改善了桥梁受力情况，充分发挥了桥梁中各种材料的力学性能，降低了结构的厚度及工程经济指标，从而延长了桥梁的使用寿命。

1 工程概况

天津市快速环路工程津塘路至张贵庄路段（以下简称快速环路工程）。高架桥分L、R两幅线，上跨河道、轻轨、公路和铁路，全长约4 700 m，桥梁正常段单幅标准宽度为16.5 m。高架桥第一合同段R线R20－R25的结构设计为5跨1联单箱单室现浇预应力混凝土箱梁，跨径为28 m＋28 m＋28 m＋27 m＋27 m＝138 m，箱梁高2.0 m，中跨腹板厚0.5 m，边跨中跨腹板厚1.0 m，采用体内与体外预应力相结合布置的形式。该工程体外预应力布置在箱梁腹板内侧（箱室内），每跨箱室内设2道转向块，与腹板相连，预应力体系两端设锚块。转向处设转向器及钢套管；钢套管穿过加密的转向块钢筋并与之焊接牢固；中墩横梁墩顶只设转向器（见图1）。

体外预应力体系锚具拉索全部采用柳州欧维姆（OVM）公司生产的环氧涂层OVM－UI成品束，共8束。每束22根OVM－UI拉索，单束长度为71.2～73.6 m；张拉方式为单向张拉，分别在R22－R23跨设张拉、锚固端。锚具采用OVM15－22可更换式体外预应力专用锚具。

收稿日期：2004－07－09

作者简介：史伟明（1964－），男，山东莱州人，高级工程师，硕士，天津市政工程局市政工程管理处副处长。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

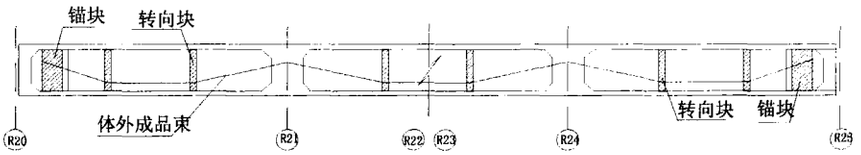


图 1 体外束段箱梁纵断面

2 OVM – UI 体外预应力体系组成

该体系属于无灌浆、可拆卸替换的无粘结体外预应力体系，由钢索、钢索的防护系统、转向装置、锚固系统、减振器等部分组成，见图 2。

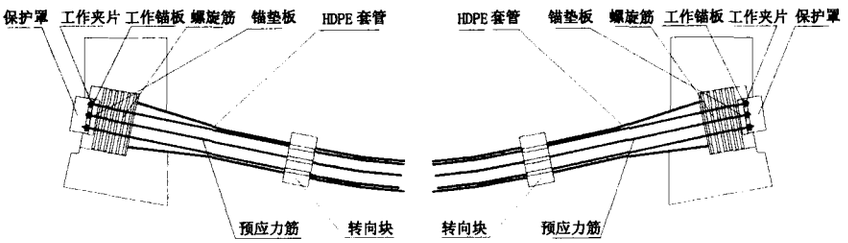


图 2 OVM – UI 体外预应力体系

2.1 钢索

体外预应力钢索的结构形式多种多样，所用材料绝大部分是以高强钢绞线为主，只是防腐方式有所不同。为保证整个体系的防腐性能和安全稳定性达到最佳，该工程选用的是高强钢绞线加环氧喷涂工艺防腐，其标准强度 $R^{y}_{b} = 1\,860$ MPa，$E_y = 1.95 \times 10^5$ MPa。

2.2 防护系统

整套体系的防护主要包括两个方面，一是钢索自身的防腐，由环氧层、油脂层、PE 层组成；二是钢束外部的防护，用无防腐作用的外层 PE 套管（PE 料为日本产黑色高密度聚乙烯）。套管可对其内部无粘结筋起保护作用，以防止动物（如老鼠等）或人为破坏无粘结筋，见图 3。

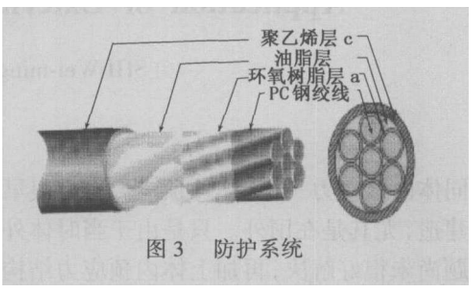


图 3 防护系统

环氧喷涂是引进日本高环保无污染高压静电喷涂技术，将环氧树脂粉末喷射于钢绞线上，然后加热熔融、固化、冷却，从而在钢丝表面形成一层致密的环氧涂层。该保护层具有化学稳定性优良、温度稳定性优良、对金属材质的附着性好、抗阴极分解好、耐曲折度优良、抗冲击性优良、耐磨性好、低氧渗透性好等优点。

由于环氧喷层钢绞线目前在国内刚刚研制成功，尚无这方面的国家标准，本次施工除按照普通钢绞线作常规试验检测外，还进行了其他项目的检测，见表 1。

2.3 转向装置

该工程体外索设计位置在箱梁箱室内，可以免受

表 1 OVM – UI 体外预应力索环氧喷层钢绞线检测项目

项目	试验方法及条件	标准要求
外观	现场随机截取用目视检查	涂膜均匀表面光滑平整
耐冲击性	耐冲击试验法	冲击的部位以外涂膜无损伤
可弯曲性	用油压千斤顶进行弯曲加工	涂膜无损伤
涂膜硬度	用 H 型铅笔手划	涂膜无破损和划伤
涂膜硬化度	用试剂来回抹拭	涂膜无软化和黏着
耐腐蚀性	NaCl 盐水喷雾试验	钢绞线表面发锈率在 0.5% 以下
耐化学药品性	溶液进行浸渍试验 1 000 h	钢绞线内部及表面均无发锈
柔软性	用与无涂装 PC 钢绞线比较的方法进行	挠度差在 4% 以下
疲劳强度	用与无涂装 PC 钢线线比较的方法进行	疲劳试验结束后分别对两种钢绞线进行拉伸试验并比较

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

太阳光的直接照射，减少紫外线的腐蚀，加上体系成品索自身设计有防护系统，因此体外索的防腐关键在于转向部位及锚头部位。

在转向部位，由于汽车荷载的作用，钢索会产生微动，从而不可避免地对 PE 层产生磨损。另外，在无粘结筋的防护理论中，PE 层是处于无应力状态的，而实际工作状态中，转向部位的 PE 层会受到一定的应力作用。实践证明，PE 层在受应力作用的情况下，使用寿命将有所降低。

OVM – UI 体外预应力体系的转向器见图 4。该转向器的转向管内有 22 根相互平行的导向管，以此保证钢绞线之间位置的平行。每根钢绞线受力均匀，可减小钢绞线与转向器之间的微动磨损，并可以进行单根换索；各根导向管之间通过 3 块连接板连成一体。

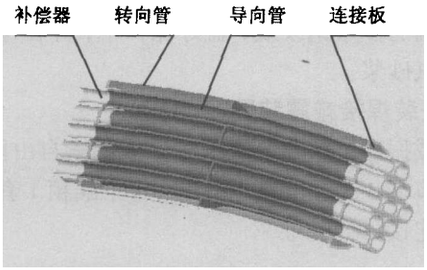


图 4　转向器

导向管有一定刚性和柔韧度，可以在水平及垂直两个方向任意改变形状以适应不同方向、不同弯曲半径的转向管的需要。中部连接板的圆周上有 3 个调节螺栓，可以改变导向管的弯曲半径。每根导向管两端均有 1 个误差补偿器，补偿器内孔为喇叭形，可以补偿施工误差引起的角度误差。

2.4　锚固系统

在锚固端，钢绞线处于裸露状态，既无油脂防护，又无 PE 层的防护，防腐条件较差。

锚固端采用特制配套双层喇叭管结构（见图 5），并在内层喇叭管内灌注水泥砂浆、环氧砂浆或油脂。这种结构，既可方便换索，又可借助砂浆的握裹力提高整个体系锚固的整体性，且对裸露的钢绞线起到加强防腐的作用。

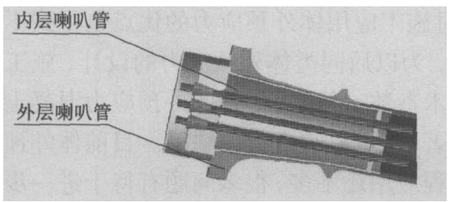


图 5　锚固系统

2.5　减振器

车辆动载等因素会引起结构与索体产生振动。为避免索体的自振频率与整个结构的振动频率接近，给结构安全带来隐患，必须在适当的位置安装减振装置，使索体自由段的振动区间变短并给索体适当的减振，以避免索体产生有害的振动。

现有的减振器在安装前，先要安装索体收缩紧固装置。由于索体间不能完全收紧，索与索之间仍然存在着间隙，施工较为复杂，减振效果有时不明显，为此，体系中的减振器采用有很好的减振效果且操作较为方便的单根减振形式。

3　OVM – UI 体外预应力体系的施工

3.1　施工流程

R20 – R25 箱梁施工流程为：

满堂支架箱梁施工→安装转向器导向管锚垫板→浇注转向块（锚块）→体外索穿索→张拉体外索→锚头密封筒灌浆 →安装焊接减震装置 → 安装防松装置保护罩

3.2　预埋钢套管（锚垫板）

在满堂红支架箱梁施工阶段，在箱室两侧腹板内侧绑扎锚块体和转向块（见图 6、7）钢筋，并在锚块、转向块节端预制过程中，把转向器导向管（钢套管）安装在设计指定的转向块位置上；锚垫板、螺旋筋、预埋管装配好后，安装在锚块位置上。所有配件安装完毕后的三维坐标均须符合设计要求，并与结构体钢筋固定。此工序是实施体外预应力体系的第一步，也是重要的一步。坐标位置必须准确，因为这涉及到体外预应力索的位置和线形能否准确无误，也涉及到体外预应力的最终效率。

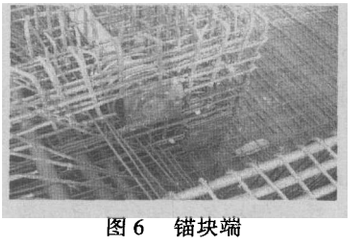


图 6　锚块端

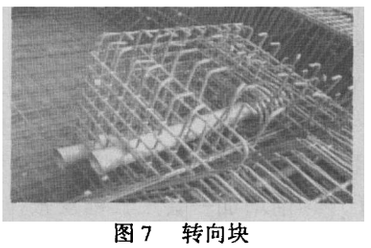


图 7　转向块

3.3　安装转向器导向管锚垫板

待转向节端养护完成后，将转向器中的导向管穿

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.

过中间连接板，再在导向管两端安装误差补偿器；待全部导向管均穿过中间连接板后，调节中间连接板上的 3 个调节螺栓，整体放入转向管中，再安装 2 块端部连接板；之后在转向管内部和导向管之间的空间灌注水泥浆，安装锚头部分，见图 8。

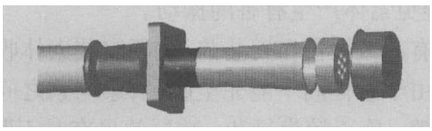


图 8 转向器、中间连接板与锚头等的组装

3.4 体外穿索

为方便施工时放索，在加工制作成品索的同时，在成品束端头均设有便于与钢丝绳联接的带孔锥形刚性连接装置——即“牵引头”。在工厂内制作完成的成品索卷制成盘运抵现场，箱梁混凝土浇注养护完成后，利用 3 t 卷扬机牵引成品缓慢解盘放索并穿过对应的预留索孔（对应自由段预留）。将钢绞线成品束一端从自由段由上往下依次穿过 PE 管、转向器、PE 管、转向器、PE 管、内衬套、锚板、保护罩，再将钢绞线另一端穿过内衬套、锚板。牵引过程中，采用外裹防护布的保护措施以防止索体表面的 HDPE 护套受到机械损伤。在体外索进入预埋定位导向管前，根据精确测量的两锚固端的实际距离，剥除两端 PE 层，确保在张拉后索 PE 层进入预埋管的长度为 100 ~ 600 mm，最后，用清洗剂清除裸露的钢绞线的防腐油脂。

3.5 体外索张拉

3.5.1 张拉准备

施加预应力所用的机具设备及仪表等，根据体外索的类型选 YDC240Q 千斤顶、YCW500A 千斤顶及 ZB4/500 油泵，进行配套标定，确定压力表和张拉力之间的对应关系曲线。

通过同期养护混凝土试件试验确定箱梁混凝土达到的强度。在达到设计要求的 95% 后，安装 OVM15 - 22 锚具及 OVM 夹片，力求各根钢绞线孔位对齐，锚具紧贴锚垫板，注意保护各组装件不受污渍。尽量使千斤顶的张拉作用线与钢绞线的轴线重合一致。

3.5.2 整体张拉

利用 YCW500A 千斤顶进行整体张拉，张拉控制程序为 0→10% σ_k→20% σ_k→100% σ_k（持荷 2 min）→锚固。由于体外索比较长，为防止反复张拉使夹片失效，在千斤顶前增加一套工具锚及张拉撑脚，千斤顶与锚板间设限位板。每次张拉后，自动工作锚夹片处于放松状态，在完成一个行程回油时自动工具锚夹片锁紧钢绞线，多次倒顶，直到张拉到设计吨位。由于限位板的作用，在张拉过程中，工作夹片不至于退出锚孔，在回油倒顶时，工作夹片不会咬住钢绞线，工作夹片始终处于“悬浮”状态，在张拉到位后，旋紧定位板的螺母压紧夹片，随后千斤顶回油放张，使工作夹片锚固钢绞线。

3.5.3 张拉应力的控制

体外索采用应力控制方法张拉时，以伸长值进行校核。实际伸长值与理论伸长值的差值必须符合设计要求，按照设计规定，实际伸长值与理论伸长值的差值控制在 ±6% 以内。

3.6 锚头密封筒灌浆

张拉完成后，在锚固端的锚头及密封筒内，按设计要求灌环氧树脂。利用专门灌浆泵从锚板灌浆孔灌浆，当排气孔冒出浓浆后堵住排气孔停止灌浆再封堵灌浆孔。

在锚板端面的 5 cm 处用手提砂轮机平整地切除锚头两端的多余钢绞线，盖好保护罩，并在保护罩内灌注环氧砂浆。

3.7 安装焊接减震装置

把减振器装置安装在体外索成品索自由段上，距离转向节端 3 m，上下螺栓卡紧，每个隔箱 1 套并与箱梁底板连接，见图 9。

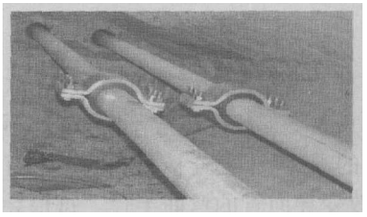


图 9 减振装置

3.8 安装防松装置保护罩

按照要求切除锚头两端的多余钢绞线后，安装防松装置，拧紧螺母，以达到有效地防止夹片松动的目的。安装保护罩，拧紧螺母，使之与锚垫板连接，保护锚头，同时向保护罩内注防腐油脂，防止端头裸露钢绞线受腐蚀。

4 结语

在天津市快速环路工程高架桥中首次采用体外预应力技术，使该桥建设的技术含量有了进一步的提高；通过施工应用体外预应力的优点也得到不同程度的体现，为以后同类体外预应力的设计、施工提供了一些技术参数。但是，尽管体外预应力混凝土结构的优点显著，但也有它自身的缺陷。目前体外预应力技术的工程应用还不多，很多问题有待于进一步的探索和研究。

© 1995-2005 Tsinghua Tongfang Optical Disc Co., Ltd. All rights reserved.