

北京水长城景观悬索桥施工技术综述

赵艳¹ 李晓磊²

(1 柳州欧维姆机械股份有限公司 柳州 545005 2 柳州市城市管理行政执法局柳东分局 柳州 545616)

摘要:北京水长城景观桥是一孔75m柔性悬索桥,全桥共布置主缆2根,索鞍4套,索夹及吊杆46套,抗风缆2根。主要介绍景观悬索桥主缆架设施工技术,了解景观悬索桥的施工特点、施工方法及施工要点,希望对类似悬索桥工程有借鉴意义。

关键词:景观悬索桥 主缆 索鞍

1 工程概况

水长城景观桥位于北京市怀柔区黄花城水长城旅游景区内,是一孔75m柔性悬索桥(见图1)。主缆线形采用二次抛物线,主跨长75m,矢高7.4m,矢跨比为1:10.14,桥面净宽3.5m。

悬索体系由主缆、索鞍、索夹、桥面系及抗风缆构成,全桥共布置主缆2根,索鞍4套,索夹及吊杆46套,抗风缆2根。抗风缆采用单根无粘结预应力钢绞线成品索。索夹和索鞍均为整体铸件。

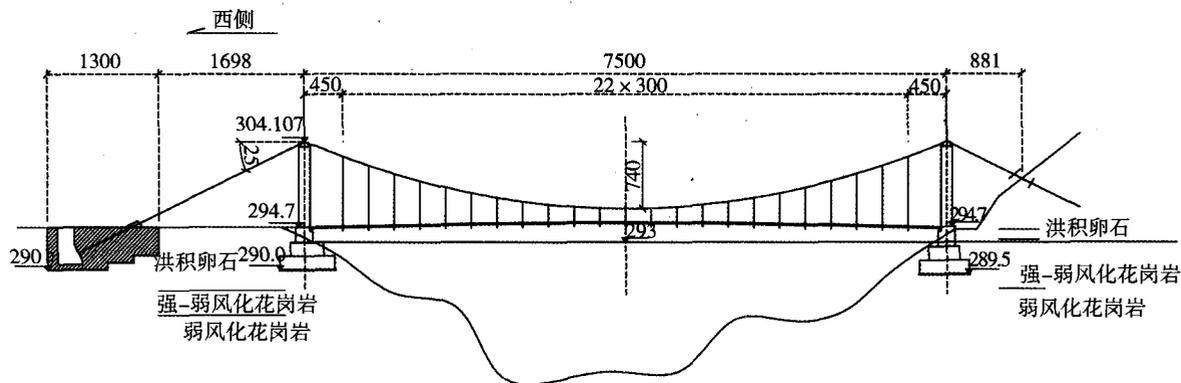


图1 悬索桥立面布置图

2 悬索桥主要构件

2.1 锚固系统

根据现场地质、地形实际条件,主缆西侧锚固体体系采用重力式锚碇,为一平面13×10m、高4.7m的混凝土结构,部分做成阶梯型。锚碇底部分设置直径25mmHRB335钢筋锚杆。东侧锚固体体系采用新型ovm岩锚体系,型号为ovm.cps15B-10,山体开挖一部分放置主缆与锚索连接体,外设防护罩。

2.2 主缆

设计主缆采用PES.HY(FD)5-127钢丝成品索,主缆放样呈东西走向,锚具采用成品冷铸墩头锚具,其东西侧锚具直接锚固在重力式锚碇后面,东侧锚具通过拉杆与岩锚体系ovm.cps15B-10相连接。设计主缆理论线形为二次抛物线,施工空缆线形为悬链线,由于地形原因,两根主缆长度有所不同,北侧主缆长119.652m,南侧主缆

长121.895m,均为无应力状态下长度。

2.3 索鞍

索鞍(见图2)是主缆通过塔顶处的重要承重构件,设计采用整体铸件,共4套。索鞍主要由鞍座、底板、鞍盖及鞍罩组成,底板及其定位螺栓预埋在索塔混凝土内,鞍座与底板之间加垫一层四氟板,鞍座与伸出塔顶砧面的预埋螺栓进行就位固定。

2.4 索夹和吊杆

吊杆布置在桥面系横梁的两端,全桥共46根,分为1[#]~12[#],吊杆采用OVM.GJ15-3钢绞线整束挤压式拉索体系,上端与索夹相连,下端采用A型锚具锚固于横梁底部。索夹采用整体铸件,为上、下两半式,通过高强螺栓的预拉力夹紧主缆。索夹分A、B两类,A类索夹用于9[#]~12[#]吊杆,B类索夹用于1[#]~8[#]吊杆。



图2 索鞍图

2.5 抗风缆

抗风缆系统由钢绞线、索夹、吊杆组成，抗风索为无粘结钢绞线，单根彩色，两端锚固于索塔上，中间与横梁相连。索夹套在钢绞线上，吊杆两头与横梁和索夹相连，全桥共布置两道抗风缆。

3 悬索桥总体施工方案

3.1 施工工艺流程

施工准备→锚索施工→预埋件安装→索鞍安装→支架及索道施工→主缆安装→索夹和吊杆安装→横梁安装→桥面施工→抗风缆施工→标高调整→防腐→清理现场。

3.2 锚索施工

为增加东侧塔柱基础的抗弯力，东侧基础设工程锚索4束，全都采用OVM.CPS15B-10新型锚索体系。

3.2.1 钻孔

开孔位置应由测量放点，钻孔方位角和倾角误差不得超过2%，主缆锚索孔的方位角应顺主缆方向，设计倾角为与水平方向夹角25度向下，基础锚索方位角为顺桥向，水平布置，为保证孔位精度，方位角应在钻孔平台上设置后视点，倾角的确定应采用地质罗盘，钻孔孔深偏差小于10cm。

3.2.2 锚索组装

因锚索采用成品索，钢绞线下料不在工地现场进行，索体长度定为16.9米，其他索体组件在现场组装，索体组装应在施工支架上进行，索体摆放应顺直。

3.2.3 锚索安装

锚索在穿索时，在孔外应平直，弯曲半径不

小于3m。锚索入孔时，注意保持回浆管朝上，锚索送入孔道的速度应均匀，不得过多的来回抽动锚索体，防止损坏锚索体或使锚索体整体扭转。

3.2.4 灌浆

灌浆采用纯水泥浓浆灌注，水灰比0.4:1，水泥强度等级为：42.5，孔内灌浆采用一次灌浆，底部进浆管进浆，上部孔口排水、排气、排浆。要求进浆量大于理论进浆量，排浆比重等于进浆比重、且不再吸浆后方可结束灌浆。灌浆压力0.2MPa。基础锚索因是水平的，在灌浆前应用108胶水和水泥的混和物封堵孔口，以防止因漏浆而产生的孔内浆体不饱满。

3.2.5 锚索张拉

安装工作锚具、限位板、夹片、千斤顶及工具锚，安装前工作锚具的锥形孔及夹片表面应保持清洁；为便于卸下工具锚，工具锚上孔的排列位置须与前端工作锚的孔位一致，不允许在千斤顶穿心孔中钢绞线发生交叉现象。

锚索张拉时，应逐级加载逐级测量锚索伸长量。锚索张拉分两个阶段，第一阶段应取20~30%的设计张拉荷载，对其预张拉1~2次，使其各部位的接触紧密，钢绞线完全平直。

第二阶段再拉至设计张拉荷载的100%即1500kN，锚索张拉分级如下：预紧→300kN→750kN→1125kN→1500kN（最终锁定）

每一级张拉稳压10min。张拉时应记录每一级荷载伸长值和稳压过程中的伸长量，且与理论伸长值进行比较。实测伸长值不得大于理论伸长值10%，小于5%，锁定时，钢绞线回缩量不大于5mm或荷载损失不大于5%。

3.3 索道施工

索道分施工索道和运输索道两部分，施工索道采用钢绞线布置在中跨，南北两侧各一幅，在桥中线上方加设一道，每幅索道由2根 $\phi 15.24$ 光面钢绞线组成，其上设置一小车可以在主跨段来回行走。索道两端用ovm15-1锚具锚固在塔顶门架顶上，通过张拉调整垂度，锚具外加放松装置。

运输索道是全桥物资运输的临时辅助工具，采用 $\phi 24$ 钢丝绳布置，一端锚固在塔顶支架顶部，一端锚固于东侧半山坡面岩体内，施工前必须用钻锚机具钻孔并埋置锚固钢筋，然后灌浆与岩

体成整体。运输索道共布置两道，每个塔各一道。

3.4 索鞍的施工

本工程索鞍4个，单个索鞍重量大约6吨，主要由鞍座、底板、四氟垫板、限位块、鞍盖与鞍罩组成，鞍座与预埋螺栓定位固定。索鞍的底板布置在底座下方，必须与索塔砣同时施工，当索塔砣浇筑至最后一节时，即可预埋底板及其连接螺栓。四氟垫板是鞍座和底板之间的柔性垫层，底座就位前须将四氟板用化学沾胶粘贴在底板顶面，要求粘贴时顶面平整，不起皱，不鼓包，表面光滑。

索鞍运抵工地后在山顶卸车，先利用运输小车送到运输索道处，再利用运输索道牵引到塔顶，然后用葫芦转换将索鞍体就位于底板上，安装底座上的紧固螺栓，采用扭矩扳手施拧，紧固力由设计确定。

3.5 主缆的施工

主缆为PES.(FD)5-127钢丝成品索，长度约120m，单股重量约2.4吨，拟采用5吨卷扬机完成主缆的牵引工作。主缆的安装施工工艺是：运输→牵引→横移入鞍→线形调整→张拉锚固。

3.5.1 主缆的运输

主缆到山顶后卸车，改用铲车把主缆运到半山坡空旷处，置于放索盘上，注意运输过程中要做好保护工作，不能使主缆拖地行走，且捆扎严实，不能散乱。

3.5.2 牵引系统的布置

根据现场条件，将主缆放在桥东侧放索，牵引用的卷扬机也放在东侧，放索盘置于东侧，主缆解盘时自东向西放索。索盘与东侧桥塔之间的过渡段须搭钢管支架，支架上设置滚轮供主缆行走，每2米设置一道滚轮，主缆脱离滚轮抬高后沿着运输索道牵引至东侧塔顶，然后顺着中跨索道向西侧方向行走，一直到西侧锚碇。

3.5.3 牵引

牵引绳的布设：将牵引绳放长，置于索道正下方，通过塔顶索鞍至东侧放索盘处，并与主缆头部相连，塔顶及拐弯点处设置导向滑车，塔顶处另设两道滚轮，以保护主缆通过塔顶时外层PE保护层不致挤压破裂。

牵引：启动卷扬机，缓慢牵引主缆，当主缆

牵引脱离支架上的滚轮时，在索道上设置一个1吨滑车，倒挂于钢丝绳下方，下端设置抱箍将主缆提起，然后继续向前牵引，如此每向前牵引10m即设置一道滑车，直至到东侧塔端时即将该处滑车和抱箍卸下，用于主跨段的牵引。按照上述办法将主缆牵引至西侧锚固处。

3.5.4 临时锚固

为安全起见，主缆牵引至锚固点后，立即安装张拉机具，适当张拉锚固。

3.5.5 入鞍

在索鞍两头主缆上安装夹具，门架两端各挂一个3吨葫芦，同时收紧葫芦将主缆提起，利用刀具将索鞍段主缆PE保护层剥除，裸露钢丝用丙酮清洁表面油脂，然后横移主缆放入索鞍槽内，并使主缆标记点与索鞍中心点重合，同一根主缆两个最高点应同步入鞍，夹具内侧应加垫保护层，以保护主缆，见图3。



图3 主缆入鞍图

3.5.6 线形调整

主缆的空缆线形调整分主跨与边跨两段进行，先调整主跨线形后再确定边跨线形。线形调整应在温度稳定、主缆各处温差不大、无大风雨的夜间进行。

主跨的线形可以在塔顶手拉葫芦慢慢进行，测量控制点高程应在主缆平静稳定后方可进行。边跨的线形可以采用在锚固端张拉主缆的方式实现。其中西侧（单根主缆）采用一台千斤顶直接张拉主缆的冷铸锚头，东侧采用两台千斤顶同时张拉拉杆。

主跨线形调整完成时立即安装锌填块及压板，同时索鞍压盖再调整边跨线形，同时在索鞍出口两

侧主缆上做好标记,以检查主缆在鞍槽内有无相对滑移。空缆的线形控制是悬索结构建设成败的关键所在,必须准确控制。

为了保证线形调整的精确性,调整前必须排除影响调整的各种不利因素,尤其是干扰主缆的各种障碍,因此必须使主缆与索道相脱离,除掉牵引主缆过程中设置的滑车与抱箍。首先可以将索道钢绞线或钢丝绳放松降低使索道不受主缆拉力,再利用移动挂篮将各抱箍和滑车逐个拆除。拆除完毕后再张拉索道承重索,恢复原状。

3.5.7 索力调整

按设计要求,空缆状态下,西侧理论张拉力为233kN,东侧北边缆索张拉力108kN,南边缆索张拉力152kN,要求分两次张拉,第一次张拉60%,分别为139.8kN、64.8kN和91.2kN,铺设桥面板之前进行第二次张拉到位。桥面系全部安装完成后的理论张拉力分别为414kN、420kN、420kN。

西侧主缆(单根)采用1台YDC240Q千斤顶张拉,东侧主缆(单根)则采用2台YDC240Q千斤顶同时张拉,张拉时应东西、南北四点同步进行,严格控制张拉力、主塔位移和主跨跨中点垂度。

3.6 索夹、吊杆的安装

索夹为上下两半式,靠M22×8.8级高强螺栓连接,将各索夹两端的位置在主缆上对应标记,以便查验、复核。吊杆为OVM.GJ15-3钢绞线成品索,上端与索夹销接,下端锚固在横梁底部。

3.6.1 安装索夹

(1) 施工平台

采用中跨索道协助安装索夹,设计挂篮作为施工人员的操作平台,在索道小车下方悬挂一挂篮,设置手拉葫芦,可上下调整挂篮高度,索道配置循环牵引系统,可使小车顺桥向往返移动。

(2) 运输

将部分索夹运到旧桥桥面上,施工人员随挂篮牵引至安装位置,到位后将挂篮临时固定于主缆上,人工用绳子将索夹吊上挂篮内。

(3) 剥除PE

根据索夹长度,在主缆表面画圆,利用钢锯片照圆形标记剥除主缆外层PE保护层,内层PE两端各少剥3cm,以能够嵌入索夹端部齿口内。

(4) 缠丝

为了增加索夹的抗滑力,剥除PE后,应在主缆钢丝外表面缠绕一层1mm的钢丝,要求排布紧密,密实箍在主缆上。缠丝可以采用辅助工具人工进行。

(5) 安装

将上下两半索夹合并套在主缆上,缝口对齐,装入连接螺栓并进行初拧。用水平尺检查索夹垂直角度、索夹缝隙、纵向位置误差情况,合格后施拧螺栓。

(6) 螺栓紧固

利用扭矩扳手分级、同步、对称对索夹螺栓施加扭矩至设计力,详细记录各级扭矩及索夹缝隙、偏角、螺栓外露量等。

3.6.2 安装吊杆

利用小车将吊杆牵引至索夹下方,编号与索夹对应,上端用销轴连接于下半索夹的耳板上。

3.6.3 安装注意事项

(1) 索夹安装应南北两侧同步进行,安装顺序为先跨中,后1/4、3/4跨。吊杆安装顺序与索夹同。

(2) 施工挂篮应定人、定量使用,严禁超载,卷扬机须专人操作,指令明确。

(3) 扭矩扳手使用前应标定合格。索夹螺栓的紧固应随工况的变化重新施拧至设计力:安装索夹时进行初拧,桥面板、栏杆安装前第二次施拧,全部桥面系完成后进行终拧。

3.7 横梁的安装

3.7.1 准备工作

横梁为槽钢拼装件,全长4.2m,横梁加工好之后提前运抵工地,放置在桥梁西岸,吊装前可在横梁两端外侧焊接一吊装耳板,按吊装顺序置于西侧桥墩处。

3.7.2 牵引

将南北两侧索道小车下的承重绳放低,分别与横梁两端的耳板相连,收紧葫芦将横梁提高地面,启动牵引卷扬机,两侧小车同步行走,横梁于底下走过,牵引至吊杆处。

3.7.3 落梁

横梁牵引至安装位置后,再次收紧葫芦,将横梁抬高,同时将吊杆下端穿入横梁上的预埋钢

管内, 锚头露出底部钢垫板后, 旋上锚固螺母, 然后放低葫芦链条, 使横梁回落至锚固螺母上。

由于横梁等桥面系重量是由吊杆来承担的桥面系的标高由吊杆长度控制, 为了准确确定横梁的高度, 施工时应精确计算各吊杆的有效长度并对应吊杆上做好标记, 安装时直接将螺母旋合至标记点后锚固, 同时需要测量人员现场监测控制, 根据实际情况调整。

3.7.4 横梁的安装顺序

应以两个主塔为中心, 逐步向跨中对称进行安装, 吊装过程中须密切观测主塔的位移及主缆的线形。

3.7.5 横梁吊装

横梁吊装是靠南北两侧索道牵引索夹下放的, 因此牵引过程中南北两侧小车要同步运行、速度一致、方向相同, 而且横梁牵引时, 位置要稍低, 从已安装的横梁底部通过, 待牵引至安装位置时再抬高。

3.8 桥面系的安装

全桥23片钢横梁安装完成后随即进行其它桥面系的安装, 包括纵梁的安装、纵梁与横梁的联结、桥面木板的安装、栏杆的安装等。

3.8.1 牵引

由于纵梁较长, 不能用南北侧索道运输, 为了避免吊杆对纵梁的影响, 安装时采用中间索道运输纵梁, 并将纵梁按顺桥向放置, 牵引到位后放落至横梁上, 两端与横梁安装孔对齐后, 穿入螺栓临时固定。

纵梁的安装顺序与横梁相同, 即以两个主塔为中心向跨中推进, 同时南北两侧对称向桥面中线安装。

纵梁安装完成时全面测量桥面标高并做局部调整, 符合设计要求后对定位螺栓施拧至设计力。

由于新桥桥面在旧桥下方, 不方便施工, 因此旧桥必须在安装纵梁前拆除。

3.8.2 桥面木板的安装

桥面木板包括防腐落叶松木板与压木, 松木板搁在纵梁顶部, 松木板上面铺设压木, 压木与纵梁之间用连接螺栓定位固定。

3.8.3 栏杆的安装

将材料运输到桥面, 就位于横梁两端, 使栏杆立柱与横梁的预埋方板重合后电焊固定, 要求

栏杆安装角度竖直, 前后两排栏杆同线。

3.9 抗风缆的安装

3.9.1 穿索

按长度下料钢绞线, 将两头锚固段剥除外层PE, 一头从西侧沿预留孔道内穿入直到东侧索塔锚固点, 安装锚具临时锚固。

3.9.2 张拉

采用YDC240Q千斤顶张拉抗风索至设计力13kN, 要求南北两根四个点同时进行张拉。

3.9.3 安装索夹和吊杆

在抗风缆上安装索夹, 索夹位置在横梁端头处, 然后安装吊杆, 调整吊杆端头的U形螺栓, 使吊杆适当受力。

3.9.4 抗风缆防腐

在抗风缆锚固段的孔道内灌注防腐油脂, 端口密封; 在锚具外侧用砂浆封锚。

3.10 防腐施工

由于索夹安装时需要剥除主缆的PE保护层, 破坏了该处的防腐功能, 因此成桥后需对该处主缆进行修复。主缆防腐内容包括索夹的防腐、主缆锚头的防腐及索鞍的防腐。

3.10.1 横缝的处理

两片索夹之间的缝隙即横缝采用HM106防腐材料调成腻子后填充, 用刮刀抹平。索夹与内层PE之间的缝隙即环缝亦采用HM106防腐腻子填充, 要求所有缝隙填充密实, 不留气孔。

3.10.2 环缝的处理

索夹两端采用热缩护套将索夹端部与主缆外层PE连接, 通过加热后紧密收缩在主缆表面。施工时要求加热温度适宜、搭接长度合理、外形均匀美观且不留缝隙, 如图4所示。

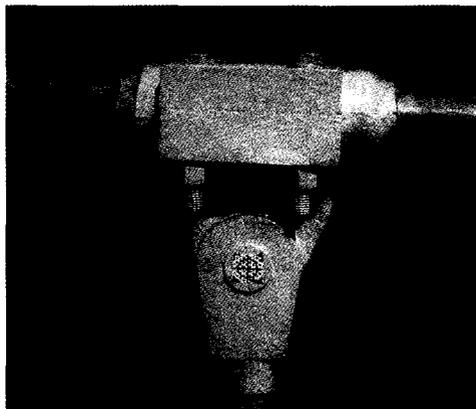


图4 索夹防腐图 (下转第38页)



图12 索夹螺栓拧紧

2.7 吊索的安装

在待装吊索的索夹下方、猫道的钢丝网上剪开一个直径约0.5m的孔。用汽车将吊索运至猫道下方，利用锚碇上的5吨卷扬机从开洞处将吊索逐一吊装。

2.8 索鞍顶推

在主缆架设和钢梁吊装过程中，由于中跨水平分力大于边跨水平分力，会导致主塔塔顶向中跨偏移。因此在安装索鞍时，各索鞍已按设计要求向边跨预偏了一定距离并临时固定。在中跨载荷增加的过程中，利用设在塔顶的千斤顶和反力装置将索鞍顶推至索塔垂直的位置，使中跨与边跨的水平分力大致平衡。按设计要求，钢梁吊装完成后，索鞍即可顶推至最终安装位置并固定。

2.9 猫道的拆除

在主缆防腐工作全部完成后，用化整为零的

(上接第34页)

3.10.3 锚头的防腐

在锚杯内涂抹防腐油脂，锚头外安装保护罩，密封后往保护罩内灌满防腐油脂，如图5所示。



图5 锚头防腐图

3.10.4 索鞍的防腐

在索鞍出口两端安装保护罩，将该处主缆密封，在索鞍外面再加一个鞍罩，鞍罩与底板之间用螺栓连接固定，如图6所示。

方法拆除猫道。先由高至低拆除每道猫道上的钢丝网片及槽钢。然后解除塔顶连接后利用卷扬机将承重绳下放至桥面。

3 上部悬索结构施工小结

缅甸LEINLI悬索桥上部结构施工的工具及材料均由OVM提供，种类齐全、质量可靠，保证了施工进度和施工质量。中缅双方克服物资缺乏，因地制宜地使用了一些适合工地实际情况的施工方法，安全快捷的完成了施工任务。

锚碇浇注过程中，缅方使用的木模板过于单薄，造成少数锚头角度超差。通过加工钢制斜垫块来调整偏差。

4 结束语

经过OVM与缅方项目部的通力协作，LEINLI悬索桥于2010年11月2日通车，缅甸国家领导人对OVM公司提供的材料、技术和服务，所涉及的上部结构施工的安全顺利、快速度和高质量，及整桥质量给予了高度的肯定和赞赏。

参考文献

- [1] 雷均卿, 郑明珠, 徐恭义. 悬索桥设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002
- [2] 甘科, 姚新奇等. 苏丹共和国TUTI悬索桥猫道施工工艺[J]. 预应力技术, 2008(3)
- [3] 张日亮, 甘科等. 苏丹共和国TUTI大桥缆索系统施工[J]. 预应力技术, 2009(3)
- [4] 周孟波主编. 刘自明, 王邦楣 副主编. 悬索桥手册[M]. 人民交通出版社
- [5] 钱冬生等. 大跨悬索桥的设计与施工[M]. 99第1版修订版

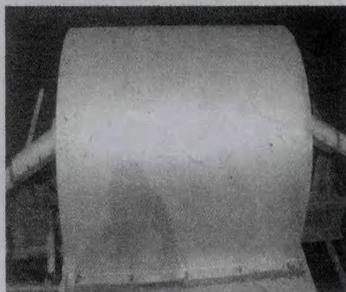


图6 索鞍防腐图

5 施工总结

施工过程中，很好的坚持运用了以上施工方法，经检测桥梁各项误差均能满足设计要求。实践表明：该施工方法合理安全，能满足工程要求，可供同类型工程施工参考借鉴。

参考文献

- [1] 周昌栋, 谭永高, 宋官保. 悬索桥上部结构施工[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
- [2] 严国敏, 周世忠. 现代悬索桥[M]. 北京: 人民交通出版社, 2002.