

南水北调穿黄工程隧洞内衬后张环向预应力系统的安装施工技术

李仁清 梁黎霞

(柳州欧维姆机械股份有限公司 广西柳州 545005)

摘要: 随着国内预应力技术的发展,后张环锚预应力施工技术逐渐成为我国水利过水隧洞工程中的一项施工关键技术。本文主要介绍后张环锚预应力施工技术在南水北调穿黄隧洞工程中的应用,对该类技术的施工工艺、操作步骤与方法、质量控制等进行总结,为以后同类型环锚预应力施工提供了借鉴和经验。

关键词: 隧洞 内衬 后张环锚预应力 施工技术

1 工程概况

穿黄工程是南水北调中线总干渠穿越黄河的关键性工程。穿黄隧洞包括过黄河隧洞和邙山隧洞,共长4250m。过黄河隧洞长3450m,坡度在北向南2000m处2‰变为1‰。隧洞段两端各设有施工井。邙山隧洞水平投影长800m,由北向南设计坡度为49.107‰,用半径为800m的竖曲线将过黄河隧洞与邙山隧洞相连。

穿黄隧洞为底板加边顶拱圆断面,内径7.0m,外径8.7m。隧洞衬砌由内外两层组成,外衬为7块预制管片错缝拼装(C50.W12.F200);内衬采用现浇法施工,为后张法预应力钢筋混凝土整体结构,采用C40.W12.F200预应力混凝土,厚45cm,标准分段长度为9.6m。预应力锚索间距为45cm,每束由12根预应力钢绞线集束而成,钢绞线强度1860级,公称直径 ϕ 15.24,公称面积140mm²。预应力张拉后,进行锚具槽回填及孔道灌浆。

隧道标准仓设计21束钢绞线,每束锚长度为24m,下料长度26m。采用 ϕ 15.24强度为1860MPa的光面钢绞线,每束由12根集束而成,钢绞线的张拉控制力为2350kN。

内衬钢筋混凝土内先预埋波纹管、注浆管和锚具槽,在混凝土达到100%强度后,先完成上部回填灌浆,再从锚具槽穿钢绞线,对钢绞线进行张拉施工。

2 施工工艺

预应力混凝土结构环向预应力筋施工采用单根绞线预紧、整束张拉分序、同序荷载分级的张拉工艺。其施工工序主要包括:锚具槽凿毛→孔道清理→锚索穿孔→锚具安装→锚索张拉锚固。详细的工序流程图见图1。

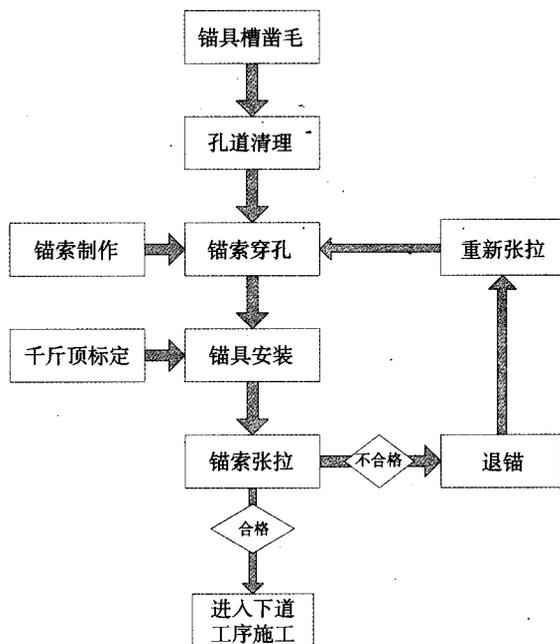


图1 预应力张拉施工工艺流程

3 施工步骤及方法

3.1 锚具槽凿毛

(1) 锚具槽面应采用人工凿毛,凿毛时要保持槽口完整,且不得损伤埋件。

(2) 为防止杂物进入孔道内,凿毛前将喇叭管口堵塞严密。

(3) 采用冲击钻对槽各面进行凿毛, 凿除厚度控制在3mm~5mm, 凿毛完成后依次采用高压风将各槽内的混凝土碴吹净。

(4) 被凿击后的表面不但要去除浮浆还应形成整体凹凸麻面, 使新老混凝土黏合为一个整体。

(5) 在凿毛后保证锚具槽的宽为32cm。

3.2 锚束制作

(1) 单根钢绞线的下料长度通过考虑孔道长度、锚夹具厚度、限位板厚度、弧形垫座长度、千斤顶长度、工具锚板厚度及其板外必要的安全长度后确定为26m。

(2) 预应力钢绞线锚束由12根钢绞线编制而成。详见图2。

(3) 成束预应力筋在编制过程中应使一端对齐, 排列平顺, 不得扭结, 采用铅丝捆扎牢固, 捆扎间距为1.0m, 近张拉端头2m以内, 每隔0.5m用铅丝捆扎一道。

(4) 制作好的预应力筋束要平顺整齐地地存放在距地面20cm的支架或垫木上, 不得叠压存放, 存放位置应有防潮、防水、防锈、防污染等措施。锚束在装卸、运输过程中严禁撞击、扭曲、受损和污染。

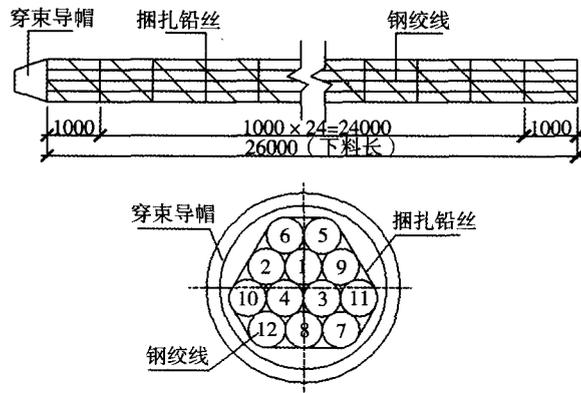


图2 钢绞线编束制作

3.3 孔道清理

(1) 首先在孔道内注入清水。

(2) 封闭喇叭口后采用空压机对孔道内打压, 利用孔内压力对波纹管杂物进行吹扫和清洗, 反复进行, 直至清理干净。

(3) 清洗后再用真空泵抽干积水, 采用视频探头检查孔道清洗情况, 检验合格后进行穿束

准备工作。

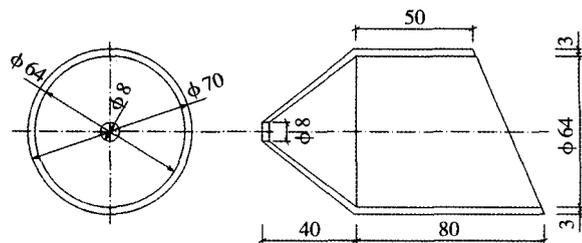
3.4 锚束穿孔

(1) 穿钢绞线前孔道应用高压风冲净、吹干, 检查钢绞线的顺直性, 不得出现扭曲现象。

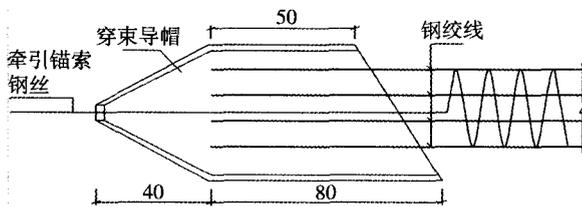
(2) 锚索安装前, 应经监理检查, 合格后方可安装。安装采用拉穿法, 入孔前装上导向帽, 然后用卷扬机牵引入孔就位。

(3) 穿钢绞线时, 应将锚束钢绞线两端编号, 并套上穿束器, 如图3所示。先把穿束器的引线由一端穿入孔道, 当引线在另一端穿出后, 拉动引线缓慢均匀逐渐地将锚束拉出到另一端, 避免锚束在孔道内反复拖动。

(4) 锚束安装完毕后, 检查并调整孔外钢绞线长度以便满足施工要求。



(a) 穿束导帽大样图



(b) 穿束导帽安装图

图3 穿束器钢绞线安装

3.5 锚具安装

(1) 钢绞线安装好后, 安装锚板、夹片、限位板、弧形垫座、千斤顶及工具锚等。安装前锚板上的锥形孔及夹片表面应保持清洁, 安装后夹片间隙应相等, 夹片后座应在同一个平面。工具锚板上孔的排列位置必须与前端工作锚板的孔位一致, 不允许在千斤顶的中心孔中出现预应力筋交叉现象。见图4所示。

(2) 锚具安装后, 如不能及时张拉时, 应将外露预应力筋和锚具密封, 严禁尘土和水进入锚具及锚板与垫板的接缝内, 并应在48小时内完成张拉施工。

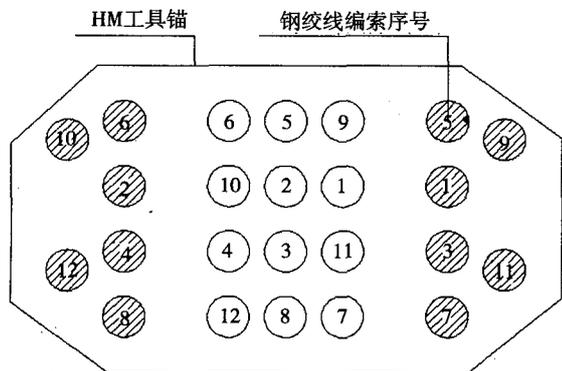


图4 钢绞线在工作锚板上的安装布置

3.6 锚束张拉

锚索张拉采用双控，以应力控制为主，同时

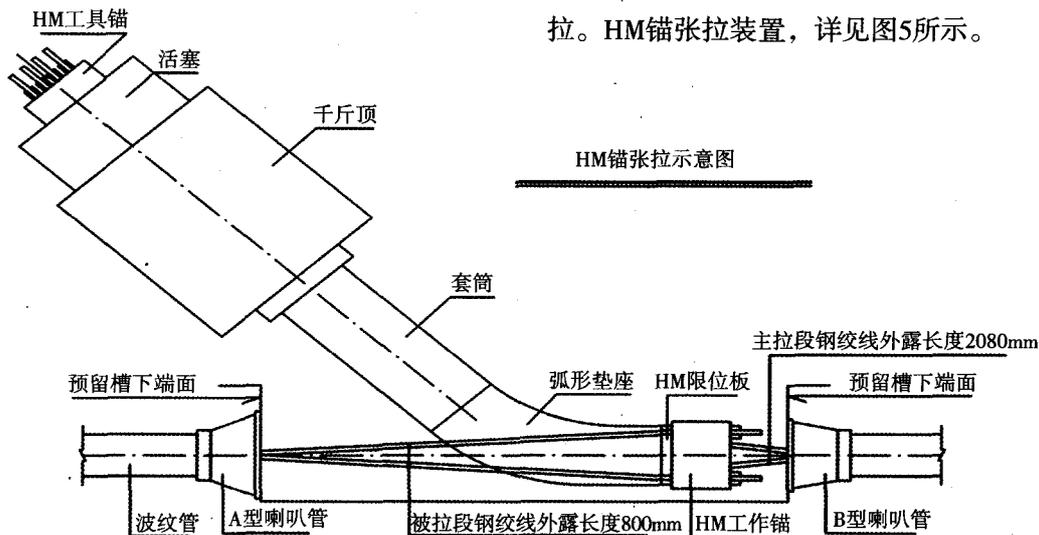


图5 HM锚张拉装置

(3) 张拉时采用逐级加荷连续进行，直至达到设计张拉力。张拉加载与卸载，应缓慢，平稳、匀速，加荷速率每分钟不得大于设计张拉力的10%，卸荷不得大于20%。每级荷载下，持荷不应少于2min，最后一级持荷应不少于5min。整束分级加载程序如下：

1) 第1序张拉：预留锚具槽布置，详见图6所示，左侧奇数号锚索按1#、3#、5#、7#、9#、11#、13#、15#、17#、19#、21#锚索顺序，自小到大，按序张拉后，再右侧偶数号按2#、4#、6#、8#、10#、12#、14#、16#、18#、20#锚索顺序，自小到大，按序张拉，张拉工序如下：

- a. 对单根绞线预紧，预紧力为42kN；
- b. 锚索整束张拉分2级，第1级张拉力为

进行变形控制。锚索张拉过程应按单根绞线预紧、整束张拉分序、同序荷载分级要求进行。

(1) 张拉前应清理施工区域与张拉作业无关的材料、设备、障碍物等，检查作业平台，台架的牢固性。

(2) 为使预应力筋松紧一致、受力均匀，要对单根预应力钢绞线进行预紧，将钢丝拉出一小段长度后，检查每根钢丝是否达到长度一致，如有不一致时，应进行调整。预紧应力为42kN，预紧级张拉应对称循环张拉，不得少于2次循环，各根预应力筋预紧伸长值差不超过3mm。预应力筋预紧受力均匀后，才能进行整束正式张拉。HM锚张拉装置，详见图5所示。

500kN；第2级为1500kN。

2) 第2序张拉：张拉顺序与1序同，即左侧奇数号锚索按序张拉后，在右侧偶数号锚索按序张拉；按如下张拉工序进行：

锚索整束张拉分2级，第1级张拉力为1500kN；第2级张拉力为2350kN。

(4) 预应力筋张拉每级加载后，应同步测量其伸长值，锁定后应测量钢绞线的回缩量 and 滑移量，并记录。

(5) 张拉过程中，夹片出现磨损时应立即更换预应力筋，张拉锁定后，夹片错牙不应大于2mm，否则应退锚重新张拉。

(6) 预应力筋张拉结束后经验收预应力损失不合格的，应补偿张拉。补偿张拉的预应力筋，

(3) 同一衬段部分拉到2350kN, 部分拉到2500kN, 单个衬砌段平均等效弹性净伸长 $S_{\text{等效}}$ 按加权平均计算, 并应满足下式条件:

$$S_{\text{等效}} = (\eta_a \sum_{i=1}^{N_a} S_{a_i} + \eta_b \sum_{j=1}^{N_b} S_{b_j}) / (N_a + N_b) \geq 106\text{mm}$$

式中: N_a 、 S_{a_i} —分别为只拉到2350kN的锚索根数和弹性净伸长;

N_b 、 S_{b_j} —分别为拉到2500kN的锚索根数和弹性净伸长;

η_a —只拉到2350kN的锚索的权, 亦称换算系数, $\eta_a=1.0495$;

η_b —拉到2500kN的锚索的权, $\eta_b=1$ 。

4.2.4 不良锚索标准

- (1) 两序张拉弹性总伸长小于101mm;
- (2) 张拉力<2350kN断丝。

4.2.5 撤换不良锚索标准

- (1) 两序张拉弹性总伸长小于90mm的锚索;
- (2) 张拉力<2350kN断丝, 且两序张拉弹性总伸长小于101mm的锚索;
- (3) 张拉力 \geq 2350kN断丝, 且两序张拉弹性总伸长小于106mm的锚索;
- (4) 断丝超过2丝。

4.3 布置有测力计的锚索张拉分级及达标条件

- (1) 布置有测力计的锚索, 张拉分级仍按试验段要求分级, 但第2序只拉到2350kN。
- (2) 布置有测力计的衬砌段锚索张拉整段达标条件

对于锚索布置有测力计的衬砌段, 锚索张拉整段达标条件与未布置有测力器的衬砌段相同。

5 张拉质量控制措施

(1) 加强内衬砼浇筑过程控制和砼养护, 达到设计强度100%后方可施加预应力, 确保砼强度满足设计要求, 避免因强度不够导致的砼张拉开裂现象。

(2) 采用5点法安装波纹管, 确保波纹管的线型和垂直度符合要求, 同时加密定位筋, 增添轨道筋, 加强接头处处理, 保证波纹管固定牢靠, 砼浇筑过程中不移位。

(3) 波纹管清孔采用高压风和水进行反复清洗真空泵抽干积水, 确保孔内无积水、泥浆,

无堵塞, 从而减少孔道摩阻因数。

(4) 对喇叭口处进行打磨, 消除坎台, 避免该处应力集中导致张拉断丝和裂纹现象。

(5) 下料后固定编束人员, 编束按编号分层捆扎后再行整束绑扎, 绑扎间距1m, 穿束时做到缓慢均匀、一次性穿束到位, 穿束后, 按两端编号, 采用编梳按号对孔, 防止钢绞线在穿孔时交叉。

(6) 用核锚代替普通的工具锚板, 增加锚固性能, 消除工具夹片处的断丝现象。

(7) 在穿索前对钢绞线涂刷石墨粉, 降低摩阻系数。

(8) 钢绞线预紧对防止断丝有较大作用, 现场采用分级预紧或整束预紧后再单根预紧, 降低钢绞线在孔道内的不均匀性。

6 锚具槽回填方法

6.1 锚具槽凿毛

(1) 锚具槽面应采用人工凿毛, 凿毛时要保持槽口完整, 且不得损伤埋件。

(2) 为防止杂物进入孔道内, 凿毛前将喇叭管口堵塞严密。

(3) 采用冲击钻对槽各面进行凿毛, 凿除厚度控制在3mm~5mm, 凿毛完成后依次采用高压风将锚具槽内的渣土吹净。

(4) 凿毛后的表面不得含有浮皮, 形成整体凹凸麻面。

6.2 腻子型止水条安装

锚具槽四周采用腻子型止水条安装, 在距离锚具槽边缘46mm对腻子型止水条进行安装, 腻子型止水条设计长度为2.6m, 在安装时用水泥钉每隔20cm对腻子型止水条进行加固安装, 在锚具槽四角上进行加密固定, 安装时要保证腻子型止水条平顺, 均匀布置。在止水条连接处采用45°相互搭接, 并用胶水粘接。

6.3 灌浆管安装

根据设计要求, 在锚具槽回填前先对孔道灌浆管进行预埋。根据设计图纸, 灌浆预埋管直接安装到喇叭口底部, 埋入喇叭口的长度为17cm, 外露长度为25cm, 用M5砂浆对喇叭口进行封堵。封堵后, 砂浆回填要和外露喇叭口的相平。

6.4 模板安装

锚具槽模板采用两块长60cm,宽40cm,厚5mm的钢板做为支设模板,模板安装采用支顶法,台架长4.5m,利用外伸的作业平台对锚具槽的模板进行支撑。由于一个锚具槽所需的混凝土方量较少,只有0.082m³,每个锚具槽的模板分两次进行支设,先下半部分,混凝土浇筑一半后再支设上半部分,采用5×10的方木直接支撑在

表1 C35微膨胀砼配合比

设计要求	混凝土各种原材料用量 (kg/m ³)							
	水	水泥	粉煤灰	氧化镁	砂	小石(5-20mm)	减水剂PC	引气剂FS-12A
C35W12F200	144	311	78	7.85	717	1126	1.17	0.090

混凝土浇筑完第一块模板后,支设第二块模板,通过第二块模板上部设计的20cm宽的窗口进行锚具槽上半部分混凝土浇筑。

6.5.1 混凝土浇筑质量控制措施:

(1) 振捣时,振捣棒不得碰触钢绞线和支设的钢模板。

(2) 加强回填混凝土周边与内衬边顶拱混凝土结合面的振捣,保证振捣质量。

(3) 加强下层混凝土与上层混凝土结合面的振捣,使上下层结合密实。

(4) 在混凝土浇筑前严格控制混凝土的设计参数。

(5) 加强混凝土浇筑前对施工人员进行技术培训。

6.5.2 混凝土拆模及养护:

混凝土在浇筑后8小时进行拆模,拆模后及时进行养护,养护时间不少于14天。

7 孔道灌浆施工方法

7.1 灌浆管预埋及加工

(1) 锚具槽回填过程中在喇叭口预留L型灌浆管咀见图7所示,固定牢靠,回填过程中加强保护,不得碰撞、损坏。

(2) 确保回填砼的密实性和强度符合设计要求,不得出现漏浆和砼开裂现象。

7.2 灌浆设备及配比

(1) 制浆设备采用高速搅拌机,灌浆泵的排浆量要满足锚索孔道的灌浆强度的需要,压力稳定;

(2) 灌浆设备配套的压力表须经校验合

作业台架的钢支撑上。

6.5 混凝土浇筑

锚具槽混凝土采用现场拌制的方法进行混凝土浇筑,严格按照批复的配合比进行拌制。用35型搅拌机进行拌制,拌制后的混凝土用皮桶直接倒入锚具槽里,混凝土达到第一块模板顶部时,用35型振捣器进行振捣,振捣过程不得碰触钢绞线和工作锚板。砼配合比见表1。

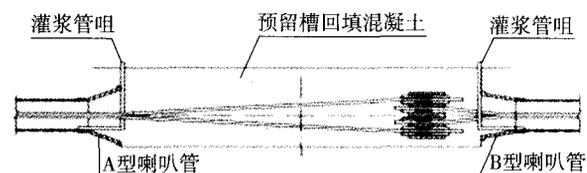
格,输浆管采用耐压橡胶管或压力PE管,其管径应满足灌浆强度的要求;

(3) 施灌时采用灌浆自动记录仪,并测记浆压、流量、比重等,流量传感器的性能应符合:流量检测范围0~150L/min,分辨率0.1L/min;压力传感器的性能应符合:压力检测范围0~10MPa,分辨率0.01MPa;

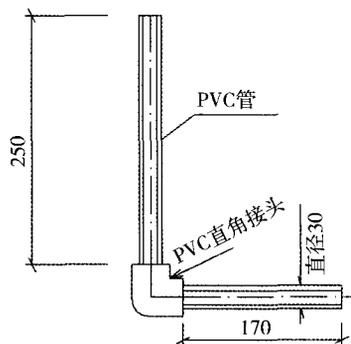
(4) 灌浆泵配套的压力传感器、流量传感器、自动记录仪等应经校验合格方能使用;

(5) 按照实验选定的注浆施工配合比调配浆液。

经过实验室配比选定实验,选用0.45:1配比水泥浆液,水泥选用42.5普通硅酸盐水泥,水泥新鲜无结块,细度为4900孔,筛余量小于2%。



(a) 灌浆管咀布置



(b) 灌浆管咀加工

图7 喇叭口预留L型灌浆管

7.3 孔道灌浆

(1) 将真泵安装到内衬边顶拱的顶部,并在锚具槽先A端后B端按下列施顺序进行灌浆。

(2) 暂时关闭预留槽高端管嘴(指由预留槽B型喇叭管引出的灌浆管嘴一下同),让预留槽低端管嘴(指由预留槽A型喇叭管引出的灌浆管嘴一下同)接进浆管,拱顶排气管嘴接真空泵管。灌浆开始时,先启动真空泵,对孔道形成 $-0.06\text{MPa} \sim -0.08\text{MPa}$ 的真空度,数值直接在表盘上进行读数,接着打开进浆管阀门进浆,并施加 $0.3\text{MPa} \sim 0.4\text{MPa}$ 的灌浆压力,待拱顶管嘴回浆后,关闭预留槽低端进浆管和拱顶排气管嘴阀门。

(3) 预留槽高端管嘴接上进浆管后,打开拱顶排气管嘴阀门,启动真空泵,对孔道形成 $-0.06\text{MPa} \sim -0.08\text{MPa}$ 的真空度,接着打开进浆管阀门进浆,并施加 $0.3\text{MPa} \sim 0.4\text{MPa}$ 的灌浆压力;当拱顶管嘴回浆后,关闭拱顶排气管嘴阀门。

(4) 高端管嘴继续加压进浆,延续灌注10min后即可堵塞灌浆孔结束灌浆。

8 施工达到的质量标准

(1) 锚具槽回填采用在现场制作的试块进行压实试验,28天强度不低于 35MPa 。达到 35MPa 以上的为合格,达不到的为不合格。

(2) 浆体强度检测:应对浆体进行7天、28天强度的检测,其中浆体试件(边长 70.7mm)28天强度应不低于 40MPa ;开灌前和灌浆结束后均应抽样检测。

满足浆液比重、泌水率、流动度等三项性能检验要求和浆体强度检测要求,方允许开灌。

(3) 注浆量检测:每条孔道灌浆的体积约为 105L ,可供判别孔道灌浆饱满程度。达到 105L 的为合格,达不到的为不合格。在灌浆前浆液搅拌各个时段的用量计算准确。

9 注意事项

(1) 注浆过程中密切注意注浆压力和注浆量的变化,当注浆压力发生突变,注浆量迅速减少或不吸浆时,应立即停止注浆,检查是否注满或进行处理。当注浆压力突然下降,增大流量仍不回升,属跑浆,应检查排气孔漏浆情况,采用增大浆液浓度的方法解决,或采用间歇注浆处理。

(2) 配制好的浆液要经常搅拌以防止浆液

沉淀,浆液不宜配制过多,以防发生意外时浆液凝结。

(3) 严格配料计算,水泥浆配制时所需水泥袋数及加水量应准确计量,以免影响结实体的强度。

(4) 认真做好注浆记录,对浆液配比、环境温度、注浆用时、注浆量、注浆终压及串浆情况等数据认真记录。

(5) 每班注浆结束后,应及时清洗注浆泵、注浆管路、搅拌机等设备,确保注浆系统处于完好状态,以便下一班组使用。

(6) 在锚具槽回填时,下部分浇筑后在初凝前进行上半部分浇筑,加强上下层结合面的振捣。

10 安全施工注意事项

(1) 必须保证钢结构台车的构架和防护设施达到承载可靠和使用安全的要求。

(2) 必须严格地按照规范、设计要求和有关规定进行钢结构台车的搭设、使用和拆除,坚决制止乱搭、乱改和乱用的情况。

(3) 台车一旦焊接完成经过验收后,不能随意改搭。

(4) 钢结构台车拆除从上至下,先拆除横向联系结构再拆除竖向承力柱。

(5) 进入施工现场必须戴好安全帽,扣好帽带,高空作业系好安全带,严禁酒后上班操作,在高空选好位置站稳后再作业,防止坠落。

(6) 施工操作平台应设置必要的栏杆。

(7) 制定项目的安全生产责任制,工地现场设专人负责有关预应力施工的安全。

(8) 施工前,由项目负责人进行安全教育和安全考核,成绩合格方可上岗。

(9) 在整个施工过程中,由安全负责人定期对全体施工人员进行具体施工要求安全交底和安全检查。

(10) 项目上制定详尽的安全管理条例和奖惩制度,各班组由兼职的安全负责人定期组织安全学习和教育。

(11) 张拉人员要严守张拉操作规程,张拉时千斤顶后严禁站人。

(12) 严禁穿拖鞋上班,进入现场必须配戴安全帽,高空临边作业必须系安全带。

(13) 加强防火教育, 杜绝火灾隐患。

(14) 规范用电管理, 所有闸箱、电缆和用电机具必须达到安全用电的标准, 做到人走断电。

(15) 尽量避免上下交叉作业, 严防高空坠物伤人。

(16) 所有施工机械必须由专人负责保管, 并且要常保养、常检查、常维修, 使其保持良好的工作状态; 设备要由专人操作, 必须严格遵守操作规程, 防止一切可能的机械伤害。

11 结束语

综上所述, 圆断面后张法环锚预应力在国内较为罕见, 内衬波纹管孔道是后张环锚预应力施工非常关键的工序, 它的施工质量影响到整个结构的受力和安全, 作为施工技术人员必需熟悉掌握。

参考文献

- [1] 中华人民共和国行业标准. DL/T 5083-2004水电水利工程预应力锚索施工规范[S]. 中国电力出版社, 2010
- [2] 国务院南水北调办主任专题办公会材料二. 南水北调中线干线预应力设计、施工和管理技术指南, 2011

信息视窗

第四届欧维姆预应力技术奖 颁奖典礼在江西九江举行

2013年9月3日上午, 詹天佑基金会欧维姆预应力技术发展专项基金第四届欧维姆预应力技术奖颁奖典礼在江西九江隆重举行, 150多名与会代表共享了这激动人心的时刻。《中国(太原)煤炭交易中心展览中心》、《宁波市外滩大桥预应力工程设计》两个项目荣获一等奖; 《塘汉快速路永定新河特大桥桥梁工程》等四个项目荣获二等奖; 《客运专线铁路64m双线简支梁桥标准化设计》等六个项目荣获三等奖。

中国土木工程学会副秘书长张洪复, 柳州欧维姆机械股份有限公司副总经理、总工程师龙跃, 柳州欧维姆机械股份有限公司总经理助理方中予, 中国建筑科学研究院研究员、预应力结构专业委员会主任冯大斌, 建研(北京)结构工程有限公司总经理、预应力结构专业委员会副主任于滨, 预应力结构专业委员会副主任李国平, 中交公路规划设计院主任赵君黎, 中国建筑设计研究院结构分院副院长尤天直, 铁道部科学研究院铁建所副研究员马林出席了颁奖典礼并为获奖代表颁奖。

颁奖典礼上, 张洪复先生代表中国土木工程学会和北京詹天佑土木工程科学技术发展基金会致辞, 并向获奖的各位专家、科技工作者表示热烈祝贺。张秘书长强调, 欧维姆预应力技术奖是经科技部批准的全国性社会力量设奖奖项, 是国家科技奖励体系的重要组成部分。他希望欧维姆预

应力专项基金在今后的评奖活动中, 严格执行《社会力量设立科学技术奖管理办法》中的各项规定, 精心组织, 认真实施, 坚持公开、公平、公正的原则, 将欧维姆预应力技术奖办成高水平、高影响力的科技奖项; 并通过奖励活动, 积极组织、引导广大预应力行业的科技工作者不断提高自主创新能力, 在预应力技术研究和应用推广方面取得更大的成绩, 持续推动我国预应力技术的进步和行业的发展。

龙跃先生代表柳州欧维姆机械股份有限公司和欧维姆预应力技术发展专项基金管理委员会致辞, 介绍了欧维姆预应力技术发展专项基金的设立背景及本届评奖的基本情况, 并衷心祝愿获奖单位及项目成员再接再厉, 不断创新, 为我国预应力技术的进步做出更大的贡献。柳州欧维姆机械股份有限公司总经理助理方中予代表专家委员会宣读了获奖名单, 随后, 获奖代表依次上台领奖, 会场里响起热烈的掌声, 为这些在科技战线做出贡献的专家表示祝贺。

欧维姆预应力技术奖设立于2002年, 其宗旨是奖励预应力领域新技术、新产品、新工艺的开发者和优秀预应力工程的设计者, 促进我国预应力技术进步和预应力工程发展。自设立以来, 已成功举办四届, 共有49个项目、397名科技工作者获得了奖励。

(王英)