

四、阿尔及尔 2500m³ 预应力混凝土球形水塔 施工组织设计

(一)工程概况

阿尔及尔城市供水系统由八座水塔组成。其中三座为预应力钢筋混凝土结构的球形水塔,每座容积 2500m³,高度 41.36m 至 46.81m,分别在阿尔及利亚首都——阿尔及尔的各主要居民区。这批工程的建成有效地缓解了该市居民生活用水的紧张状况,它的新颖造形也为城市增添了风光。

1986 年初,中建驻阿经理部,在国际招标的竞争中,以新颖的造型,先进的技术,合理的造价获得了八个水塔的承包合同。工程设计由中国建筑研究院结构所承担,工程施工由安徽分公司和省建三公司组成的水塔工程项目组承担。三座球形水塔于 1987 年 6 月开工,1989 年 10 月完成。于 1990 年 3 月、4 月进行注水试验,各分部分项工程经过业主和阿方技术检查机构 C. T. C 的验收,质量良好,顺利地通过了交工验收。

2500m³ 水塔混凝土球形结构,采用大吨位预应力张拉,施工工艺难度大,在我国及世界各国还是创举。球形结构外径 18.60m,混凝土壁厚从上到下分别为 350mm、550mm、900mm,由 $\phi 6.10\text{m}$ 筒身和四个扶壁柱及筏式基础组成的整个球塔结构。在球高 1/5 处,球内设有 1.5×2.17m 中环梁支承着整个球体及 2500m³ 水的荷载,并设有 $\phi 600\sim 800$ 钢管的上水、下水溢水和排水管道,上人平台和气窗等设施,结构抗震按 9 度地震裂度设防。

预应力混凝土球结构,采用水平环向预应力箍,共 72 道半圆预应力筋,每两道半圆预应力筋束组成完整的 36 道水平环向受力预应力筋箍。采用法国产 T15.2-1770-TBR-TEC (SC)型低松弛钢绞线,采用国产 XM15-7 锚具和 YCD-120 型重型千斤顶张拉设备,每两道对应半圆形预应力同时张拉,锚具端在球面外四个混凝土扶壁柱,沿圆弧形扶壁边缘设不同标高和间距的预应力锚固端,球体混凝土内设置 72 道波纹管预留孔道,从 1[#]到 34[#]共 34 束,用 7×7 ϕ 5—15 钢绞线,35[#]—72[#]共 38 束。用 5×7 ϕ 5—15 钢绞线,标准抗拉强度 $f_{pt,k}$ (R_g^b)=1770MPa, $\sigma_{con}(\sigma_k)=0.683R_g^b$,每束总拉力分别为 $N_1=1176\text{kN}$, $N_2=841\text{kN}$,作用在整个混凝土球体的总预应力值 $N_g=35971\text{kN}$ 。球体混凝土量共 737m³,塔基础、筒身及球体混凝土总量约 3000m³,三座球塔混凝土共为 8525m³。经过 1989 年 10 月 29 日阿尔及尔地震 (6.6 级)的考验和试水检验,混凝土球形水塔质量完全符合优良标准,达到混凝土球体不裂不渗,结构受力可靠,基础沉降量在 5mm 以内。

(二)预应力混凝土球形水塔施工工艺

1. 施工技术工艺选择

球形水塔由片筏基础、筒身、扶壁柱和直径为 $\phi 18.6\text{m}$ 的混凝土球形水柜等组成,而混凝土球形水柜的施工技术要求高,工程复杂,难度大。选择什么样的施工工艺,是完成任务的关键。混凝土水柜结构在自重 1830t 和 2500t 蓄水的恒载下,抵御 9 度抗震裂度活荷载。自 1986 年 5 月底中标后,建研院结构所和安徽省建曾作了设计、施工多方案可行性研究和对比,最后选择了圆球结构的、先进的大吨位水平环向预应力束环箍高空张拉施工工艺,XM 型锚具。经过两年多施工,和试水试验,尤其是 1989 年 10 月 29 日地震的考验。实践证明,施工技术先进,结构安全可靠,施工工艺完善,水柜不渗不漏,造价经济,外形美观,施工工艺达到了世界先进水平,突破了以钢筋混凝土建造圆球形大容积容器的结构理论和圆球预应力施工工艺技术难点,为今后非洲干旱地区城市供水采用大体积水塔提供了成功的施工技术经验,为我国在国际建筑承包工程中,树起了很好的信誉。

2. 球形水柜施工程序网络

水塔球体混凝土施工总工期 140 天,总的施工程序为先施工下半球,后施工上半球。模板先安装下半球外模板,以外模控制球体外形尺寸,再分段安装内模。绑筋后浇筑混凝土,内筒结构施工穿插进行。上半球先安装内模,再安装钢筋,分段支外模后浇筑混凝土,预应力预埋波纹管,与钢筋绑扎穿插进行。

(三)混凝土球形水塔成型施工工艺

1. 模板设计、制作与安装

根据法国混凝土施工规范要求,混凝土一次浇筑高度不得超过 1.5m,模板设计按以下方法制作与安装。

筒身和墙体模板按四等分,内外各配制四块定型模板,高度为 1.6m,墙体按最长尺寸配制定型侧模板,一块封头模板,墙体斜度的变化利用封头模板来控制,模板稳固主要是通过墙体对拉螺栓将模板牢牢夹住。

球体模板按上、下半球进行设计,上半球外模在经向设置大格栅,纬向设置小格栅,然后在小格栅上铺钉 2.5cm 厚板,并满铺铁皮,内模中环梁配制一套定型模板,中环梁以上配制一套模板,然后随高度变化根据弧长另拼安部份模板。

安装之前先将外架搭至球中心标高处,利用外架作模板支撑,根据球体直径设置两道环形带,作为大格栅定位的依据。下半球外形尺寸正确主要是由大格栅来控制,大格栅主要承担垂直压力和水平推力,垂直力由外架承担,水平推力利用在混凝土内预埋对拉螺栓,将大格栅拉住,同时为了保证外架的稳固,在架子外侧每步设一道钢丝绳箍。内模侧压力通过球内满堂架子相互抵消,内模上浮力利用架子和钢管预埋在已浇的混凝土内,使得架子不致上移,从而保证了内模不上浮。

上半球内模在经向设置大格栅,纬向设置小格栅,然后在小格栅上铺钉 2.50cm 厚板及

铁皮。外模在上半球下端配制一套定型模板,拼装组合,然后随高度变化根据弧长逐渐减少部份外模板进行变弧面。

内模安装,先将内架支撑搭至球顶标高处,分别设三道不同标高的环行带,作为大格栅定位的依据,外模几何尺寸的准确,主要靠外架和外架上每步设一道钢丝绳箍,在已浇筑的混凝土内预埋螺栓,将外架牢牢拉住。

2. 钢筋绑扎

三个球形水塔钢筋总量共 1101t,球体钢筋分上、下半球两次绑扎,下半球钢筋中环梁以下为三层钢筋,中环梁上为两层钢筋,绑扎时分层进行。绑扎第一层时,先绑扎纬向筋,后绑经向筋,依次进行。两层之间的尺寸以撑码控制,上半球钢筋的绑扎基本同下半球的方法。

3. 架子

架子搭设照常规的方法,该架子除操作利用之外,还要用来承担球体模板和混凝土重量的垂直压力,为了在模板侧压力的作用下,使架子不至外移,架子在球体范围内,按每步设置纵横向剪刀撑一道钢丝绳箍,同时在上半球范围内,按每两步设置一道拉杆,与球体预埋螺栓联结。

4. 混凝土浇筑

三个球形水塔混凝土总量共 8525m³,水柜混凝土的浇筑根据法国施工规范的要求,混凝土浇筑的高度不得超过 1.5m,球体混凝土浇筑分层浇捣,每层厚 0.5m 左右,为了减少模板变形,混凝土下料半圆交叉循环浇捣进行。

阿国不生产高标号水泥,只有 325[#]水泥,而按照我国施工验收规范规定,不宜采用低于混凝土标号 1.25 倍的水泥,避免因水泥用量过大,早期混凝土水化热过高。此外,还需解决减少混凝土在终凝至硬化过程中的湿度收缩变化,粘滞度大,高空作业空气流速大,气温高,水分蒸发快等施工不利因素。再者,水柜配筋密度大,预应力预埋波纹管较多,也给混凝土浇筑工作带来很多困难。为解决以上几个不利因素,在 2500m³ 球塔的混凝土施工中采用了适用于防渗性混凝土及预应力混凝土的法国产 Sika 液态 PLASTIMNTBY40 强力减水增塑剂,延长了混凝土的初凝时间,减少和推迟了混凝土中的水化热,达到了 S8 抗渗性能,解决了混凝土施工的难点。

混凝土在试配过程中应作不同对比,并经过原材料分析,找出最佳级配,以保证设计要求。

混凝土的质量经现场抽样做试块,强度均能满足要求。总共为 65 组,球体设计强度等级为 C28(300m³),其中 7d、14d 为 27 组,平均强度为 28.4MPa,强度合格。28d 强度为 38 组,平均强度为 35.4MPa,强度达 90% 以上占四组,100% 以上占 34 组。试块试验单位由阿方业主及阿方 C. T. C 指定,在阿尔及尔房产管理局等试验室试验。

(四) 预应力施工工艺

1. 锚固端喇叭管及软金属波纹管安装

锚固端锚板考虑灌浆需要,增加灌浆嘴,有内丝扣,并增加了闸阀,灌浆时不需人工扶枪头,灰浆既不会外流更不会喷出伤人。锚板取消浆罩,采用了水泥净浆封头措施,收到了很好

效果。

软金属波纹管代替硬波纹管作为预应力孔道成形还是第一次,采用硬质波纹管在半径4.5~9m内成形,接口处易裂,运输安装困难。为防止软管漏浆变形、穿束困难和移位等现象,在波纹管安装过程中,增加了定位钢筋支托波纹管,双向绑扎,确保波纹管位置的正确。扶壁波纹管与喇叭管接头处加焊了角钢,从而解决了波纹管在扶壁变拆中的困难。

由于球体混凝土量大,且混凝土浇筑次数多,工种交叉作业频繁,为避免施工中损坏软波纹管,漏浆变形,确保预留孔成形,在波纹管内增穿了橡胶软管,混凝土浇筑前采用多头分水器加压及冲水穿拔法。混凝土浇筑后第二天,将软管拔出。这就是“双保成孔法”,解决了软管成孔难度大的具体困难,从而杜绝了因某一孔道漏浆而造成无法穿束的困难,保证了工期。因采取措施得当,从未发生堵塞,成孔圆滑,无硬弯、损坏等现象,效果良好。

2. 钢绞线断料与穿束

预应力筋选用法国 T152-1770-TBR-TEC(SC)钢绞线,每盘重 3000kg,断料前需用大吨位塔吊或汽车吊配合,将钢绞线吊起放入开盘架内,安好保险罩后方可剪断绑扎钢带,否则反弹出来伤人,易绞乱而报废。该钢绞线为内抽芯,然后按所需断料长度在简易的下料平台上用固定式砂轮切割机将钢绞线切断,并编号堆放。

穿束前选用塔吊视线好的两个扶壁,把预应力孔道进行编号,然后用塔吊将钢绞线 1/2 的长度处用绳索吊起,缓慢就位,安装好穿束器,用人工直接穿入孔内。

3. 预应力张拉

张拉预应力必须待水柜最后一次浇筑的混凝土强度达到设计强度的 100%以上时方可进行。张拉采用四台千斤顶分两组对称张拉的方法进行,先张拉完对称一组预应力束环后,再调 90°张拉另一组预应力束环。为了避免夹片损坏,造成滑丝和解决高空千斤顶搬移难的矛盾,将两次分级加荷改为一次加荷的方法。为了做到四台千斤顶同步工作,用两只对讲机进行联系。

张拉应力分三级进行:

$$0 \rightarrow 10\% \sigma_{con} \rightarrow 50\% \sigma_{con} \xrightarrow{\text{持荷五分钟}} 100\% \sigma_{con}$$

(预张) (张拉) (张拉锚固)

为了便于在球面体的预应力锚固端安装千斤顶,尤其是球体下部,因空间操作面小,安装 200kg 重千斤顶就位难度很大,为此除设工作平台外,另设两只神仙葫芦,斜向拉紧就位。

4. 孔道灌浆

孔道灌浆是预应力施工的最后道工序,为了减少预应力损失,我们采用了张拉一批及时灌浆一批的方法。本工程选用杭州市建筑机械厂生产的 UBTa 型挤压式灰浆泵,配以同型号的带震动筛的储料斗,用水灰比为 0.4~0.45 的水泥净浆掺以 1‰的铝粉和 1%的减水剂进行灌注,灌浆压力控制在 6~8kg/cm²,稍停后补灌 1~2 次,工作压力控制在 10~12kg/cm²,全球 72 孔分次灌完。

5. 端头钢绞线切割与封头

孔道灌浆 2~3 天后,预应力筋端头多余的钢绞线,应用氧乙炔割除,为避免损伤预应力

筋,快速切割后立即用水冲洗降温。切割后外露锚环的钢绞线应大于 15mm,施工中以环氧树脂胶泥作为锚具封头,既保证了防腐、锈,又体现出预应力混凝土球塔结构外貌,增加了外观的美丽。

(五)预应力施工工艺分析

(1)张拉程序分析:按原设计要求张拉程序,先将预应力束按两种张拉应力级别进行跳档,即先张拉 50%应力值,以后再逐步补足到设计应力值。目的是减少分批张拉损失。施工时如采取以上办法张拉,每道扶壁要先后进行 8 次才能完成,工期长、钢绞线易生锈,更主要的是二次张锚具易损裂、滑丝、不安全、施工难度大。从理论计算看,球面最大直径赤道处,混凝土厚 350mm,总压缩量半径为 1.15cm,而采取一次张拉达到 100%应力值与二次张拉弹性压缩值相差 1/4,从理论分析,损失 4.8%应力。但球体预应力值有 56%集中在三分之一球面以下,而混凝土厚度又超过赤道混凝土厚度近两倍(混凝土厚 900mm),压缩量相差甚小。而从预应力束摩阻力损失测试与实际张拉伸值数值结果分析,摩阻系数平均值偏小,延伸值偏大 6.69%,预应力束实际应力值比理论值偏大。另所选用的法国产高强钢绞线为低松弛(2.5%),比原设计使用国产松弛损失值小。综合以上摩阻系数及原料等有利因素,认为在球体整个结构张拉先后是不可避免的,应力损失是客观存在的,但由于预应力束较分散,混凝土受压区范围小影响也较小。为减少二次张拉锚具损裂、滑丝、应力损失大、拆换不安全等不利因素,采用从中环梁向下大应力区,即③→①束应力,再从球顶小应力区②→④施加应力进行张拉的程序,一次施加到 100%应力的措施,即先张拉应力大的区域部位,后张拉应力小的区域,对大应力区的影响较小,可以确保工程质量。

(2)摩阻系数测试分析:混凝土球形水柜水平向环向预应力束,按照不同的高度,半径的差异,曲率也随着变化,预应力的水平环束在波纹管内的摩阻力也随着半径的大小而增减,另外预应力束的端部有一段反向包角和一直线段延伸到锚固端,而反向包角也随预应力束位置不同而有所大小,因此张拉过程中,应力应变及摩阻力是受以上三个因素制约的,这是一个随位置而确定的定量。

另一个是在施工中安装预应力波纹管通道的圆顺程度,有无拐角和混凝土浆渗透等,也直接影响摩阻系数的大小。这是施工技术和管理方面的活因素,也是确保工程质量,确保预应力值的关键所在。从球体 72 道预应力束最大半径 9.169m、最小半径 4.533m,18 道完整的预应力环箍张拉应力应变的数据来分析摩阻系数,实际值比理论值偏大,第一个塔 3°塔张拉的 72 束延伸值总和为 $\Sigma\Delta L=9962\text{mm}$,平均每束 $\Delta L=138.36\text{mm}$,而理论值为 $\Sigma\Delta L=9314\text{mm}$ 平均值为 $\Delta L=129.36\text{mm}$ 。实际延伸值偏大 6.69%。3°塔摩阻力测试 16 组数据看,实际延伸值 $\Sigma\Delta L=2165\text{mm}$,平均值 $\Delta L=135.31\text{mm}$ 。理论值 $\Sigma\Delta L=2064\text{mm}$,平均值 $\Delta L=129\text{mm}$,对比偏大 4.86%。1°塔第二次 6 组摩阻测试数据,实际延伸值 $\Sigma\Delta L=883\text{mm}$,平均值 $\Delta L=147.16\text{mm}$,理论值 $\Sigma\Delta L=810\text{mm}$,平均值 $\Delta L=135\text{mm}$,偏大 9%。

因此从以上数据分析结果,可以得出在外因影响下,摩阻系数符合理论计算值,波纹管安装质量良好,摩阻系数偏小,球体预应力的建立正确。