

倒锥壳形水柜高空现浇施工技术

宋春芳

(中冶建工集团有限公司, 重庆 400080)

摘要:倒锥壳形水柜多采用预制提升工艺安装,工期长且施工操作不当时易发生渗漏。为改善其不足,需对一种工期短、防渗质量高的工艺进行研究。文章参照以往倒锥壳形水柜施工工艺进行方案比选,确定施工方案为型钢三角托架结合满堂支撑架原位现浇的方式,并对该方案的两种工况进行承载能力验算校核,同时详细介绍了该方案的托架布置、模板支撑、混凝土浇筑等工艺及安全风险管控采取的针对性措施。经在实际工程中应用型钢三角托架结合满堂支撑架原位现浇施工技术,达到了工期短、质量高的目标,可为今后类似工程提供参考。

关键词:倒锥形水柜; 钢筋混凝土; 现浇; 三角托架; 安全管控

中图分类号: TU398

文献标识码: A

文章编号: 1673-8993(2024)10-0038-05

doi:10.13402/j.gcjs.2024.10.130

Study on construction technology for cast-in-situ concrete of the invert tapered shell on water tower

SONG Chunfang

(China metallurgical construction engineering group Co., Ltd., Chongqing 400080, China)

Abstract: The water tank of invert tapered shell used to be prefabricated and lifted, which lead to increase water leakage and long construction period. In order to improve the inadequate, it will be necessary to research a kind of construction technology with short construction period and high quality. This paper discusses some construction schemes for the water tank of invert tapered shell, determining the total construction scheme is cast-in-situ concrete by the shelf bracket of the steel combine full-hall supporting frame, checking and calculating the bearing capacity of the construction scheme in two cases, describing the site arrangement of bracket, support system, concrete casting and the control measures of security risks. Applying the shelf bracket of the steel combine full-hall supporting frame to construct the water tank of invert tapered shell, which reaches the goal with short construction period and high quality, which can be referred for similar engineering.

Key words: the water tank of invert tapered shell; reinforced concrete; cast-in-situ; shelf bracket; safety management

倒锥壳形水塔是一种结构紧凑、造型轻巧、优美大方的供水构筑物。虽说近年来,高位水塔在国内大部分地区已被无塔供水器等先进设施所替代,但在一些水资源匮乏地区和工业场区仍在大量应用。但其多采用预制提升工艺安装,导致工期长、易发生漏水且成本相对较高,为解决此类问题,开发出一种工期短、防渗质量高的工艺是非常有必要的。

参考以往倒锥壳形水柜施工的工程案例,熊学文^[1]采用满堂支撑架原位现浇的方式施工完成了容积为 3 000 m³ 倒锥壳形水柜,曲成平等^[2]设计出可整体提升的悬挑斜桁架支撑体系,从而实现了容积为 500 m³ 倒锥壳水塔水柜高空现浇施工,白兴海^[3]采用定型悬挂架结合梯形钢模板原位现浇完成了容积为 300 m³ 倒锥壳形水柜,若采取这些工艺完成本项目 700 m³ 的倒锥壳形水柜的

收稿日期: 2023-12-22

基金项目: 重庆市建设科技项目(2020 第 3-18 号)

作者简介: 宋春芳(1986—),男,高级工程师,从事施工技术、信息化和数字化等方面的研究。

施工，存在着措施材料占用量大、周转率低、投入费用高等缺点。考虑项目业主对本工程工期和质量的要求，并结合当前成熟的工艺及现场已有材料，设计出型钢三角托架结合满堂支撑架原位现浇的施工技术，解决在高空 30 m 以上倒锥壳形水柜施工工期长、易渗漏、低周转、高成本等技术难题，并优质高效地完成了倒锥壳形水柜的施工。

1 工程概况

某钢铁公司电炉升级改造项目事故水塔为钢筋混凝土结构，其总高度为 50.908 m。水柜为倒锥形，高度为 8.88 m，有效容积为 700 m³；水塔筒身为剪力墙结构，内径为 4.4 m，壁厚为 350 mm，高度为 38.8 m；基础采用桩筏基础，埋深为 4.0 m。

水柜由下环梁、下锥壳、中环梁、上锥壳、上环梁等组成，下环梁截面尺寸为 0.5 m×1.2 m，其内缘直径为 5.2 m；中环梁截面尺寸为 0.83 m×1.0 m，其内缘直径为 16.70 m；上环梁截面尺寸为 0.3 m×0.4 m，其内缘直径为 5.9 m；下锥壳壳板厚度为 300 mm，壳体母线的斜度为 42.00°，上锥壳壳板厚度为 130 mm，壳体母线的斜度为 19.13°，水柜均采用抗渗等级为 P8 的 C40 防水混凝土，水柜立面图如图 1 所示。

2 施工方案分析

2.1 方案对比分析

钢筋混凝土倒锥形水柜位置高，处于高空接近 40 m；悬挑大，其最大内缘直径是水塔筒身内直径的 3.8 倍；自重大，约为 330 t；且其施工质量要求高，安全隐患多，施工复杂，结合以往项目实施经验和本项目的特点，考虑 4 种施工方案，并进行优缺点比较^[4-6]，如表 1 所示。

经对比和可行性分析，结合项目的质量、成本、工期及业主的需求，并考虑到现场现有的型

钢，确定了型钢三角托架结合满堂支撑架原位现浇方式实施倒锥形水柜，同时制定专项措施，管控实施过程中的安全风险。

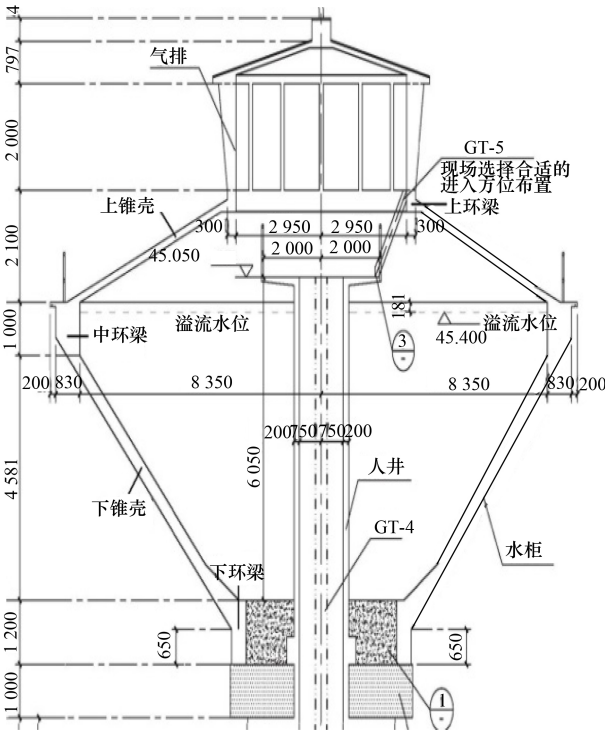


图 1 倒锥形水柜立面图 mm

2.2 型钢三角托架设计

在水塔筒身 38.8 m 标高沿着筒身均匀布置 32 根 16 号工字钢，挑出长度为 6.6 m，并在挑出长度 3.0 m 及 4.0 m 处设 $\varnothing 89$ mm×3.5 mm 镀锌钢管斜支撑，斜支撑底部焊接在筒身 34.8 m 及 35.8 m 标高预埋钢板上，预埋钢板在筒身锚固位置的中心与工字钢在塔身外侧中心水平投影重合，沿着筒身径向形成 32 榀型钢三角托架梁，具体如图 2 所示。托架工字钢上环向满铺 $\varnothing 40$ mm×2.5 mm 矩形钢管，并按径向间隔 1.5 m，环向间隔 3 榀与工字钢连接牢固，以增强型钢三角托架的侧向稳定性，使 32 榀型钢三角托架形成整体受力结构体系。

为降低工字钢悬挑端挠度过大，增强型钢三

表 1 倒锥形水柜施工方案比选

序号	方案名称	优点	缺点
1	地面预制液压提升	工艺成熟、安全性高	周期长、费用高、局部渗漏
2	满堂支撑架原位现浇	工艺简便、防渗质量高	安全隐患多、周转材料多、费用高
3	斜向悬挑桁架支撑，原位现浇	安全隐患低、防渗质量高	定型桁架支撑一次性投入，无周转，费用高
4	型钢三角托架结合满堂支撑架，原位现浇	工期快、质量高、成本低	安全隐患较多

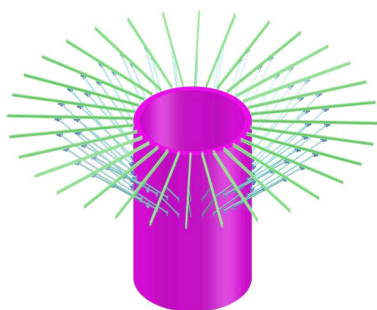


图 2 型钢三角托架布置

角托架结构体系的安全储备, 分别在工字钢挑出长度的 5.35 m 和 6.6 m 处, 采用直径 20 mm 抗拉强度为 1 870 MPa 的钢丝绳进行拉结, 其另一端分别拉结在水塔人井支筒 45、46 m 标高的预埋件上, 形成伞形拉结。

2.3 荷载分析

下锥壳体根据截面厚度和壳体母线的倾斜角度转换为水平投影面的面荷载, 环梁根据截面面积直接转换为线荷载。钢筋混凝土壳体永久荷载^[7]为 25.1 kN/m³, 钢筋混凝土梁永久荷载为 25.5 kN/m³, 模板及支撑架永久荷载为 0.75 kN/m², 施工荷载为 2.5 kN/m²。

以单榀型钢三角托架为受力单元进行验算复核, 每榀三角托架沿着内筒筒身径向均匀划分支撑分布区域, 每榀承担 11.25°扇环形区域的分布荷载。扇环形区域的内径为 3.1 m, 外径为 9.18 m。考虑到扇环形内外径相差较大, 以内径 3.1 m 为起点沿径向以 1 m 为一个区段单元, 分段将扇环形内的面荷载转换为线荷载依次施加到工字钢上。区段内荷载均匀分布, 下锥壳及中环梁施工荷载统计具体如表 2 所示, 上锥壳及上环梁荷载统计同理, 此处不作赘述。

表 2 筒身径向布置工字钢区段荷载分布(下锥壳)

扇环半径 分段/m	水平面荷载/ (kN·m ⁻²)	平均弧 长/m	线荷载/ (kN·m ⁻¹)
3.1~4.1	17.9	0.71	12.65
4.1~5.1	17.9	0.90	16.17
5.1~6.1	17.9	1.10	19.68
6.1~7.1	17.9	1.30	23.20
7.1~8.35	17.9	1.52	27.15
8.35~9.18(中环梁)	—	1.72	64.60

注: 扇环半径分段 0~3.1 m 段为水塔筒身及环托架, 挑出工字钢在扇环形区域内径 3.1 m 以外加载。

2.4 计算复核

主要对型钢三角托架整体受力进行分析, 以最大应力不超过材料设计强度 85%, 最大竖向位移(挠度)不超过 $L/400$ mm 为结构控制关键指标 (L 为受弯构件的跨度, mm)。

2.4.1 长细比复核

对外侧最长斜支撑进行长细比复核, $\lambda = l/i = (0.7 \times 5\,657)/30.3 = 130.7 < 150$ (λ 为构件的长细比, l 为构件的计算长度 mm, i 为构件截面的回转半径, mm, 0.7 为杆件计算长度系数), 满足《钢结构设计标准》(GB 50017—2017) 的 7.4.6 条的受压构件支撑容许长细比的要求^[8]。

2.4.2 承载性能

根据混凝土浇筑的顺序和次数, 主要考虑两种施工工况。

工况 1: 下壳体、中环梁混凝土浇筑后型钢三角托架的结构性能分析。经验算分析, 型钢三角托架在下壳体和中环梁混凝土浇筑完毕后, 斜支撑最大应力为 83.0 N/mm², 工字钢横梁最大应力为 85.3 N/mm², S11 应力云图如图 3 所示; 最大竖向位移发生在横梁挑出长度约 1.5 m 位置处, 数值为 4.9 mm 小于 7.5 mm ($L/400 = 3\,000/400$ mm), 满足结构设计要求。

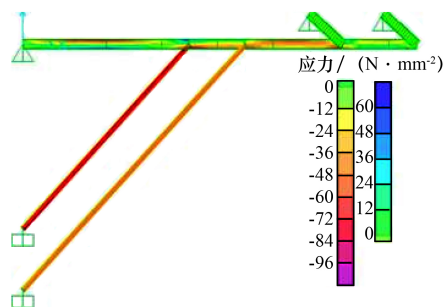


图 3 工况 1 下三角托架的应力分布

工况 2: 上壳体、上环梁混凝土浇筑后型钢三角托架的结构性能分析。经验算分析, 型钢三角托架在上壳体 and 上环梁混凝土浇筑完毕后, 斜支撑最大应力为 115.4 N/mm², 工字钢横梁最大应力为 106.5 N/mm², S11 应力云图如图 4 所示; 最大竖向位移发生在横梁挑出长度约 1.5 m 位置处, 数值为 6.9 mm 小于 7.5 mm ($L/400 = 3\,000/400$ mm), 满足结构设计要求。

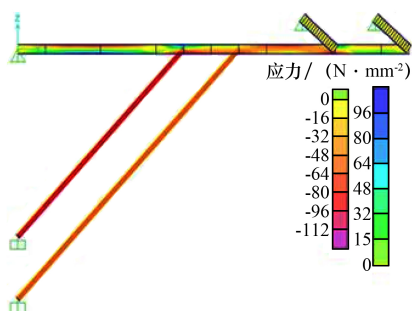


图4 工况2下三角托架的应力分布

3 方案实施

3.1 总体施工工艺

型钢三角托架工厂加工预制，塔身筒式结构需施工至 46.0 m 以上，且环托梁施工完毕后（预埋件随着筒身混凝土浇筑同步埋设），进行型钢三角托架搭设，搭设完毕后在托架上部搭设斜向满堂支撑架并铺设模板，模板及支撑体系经验收合格后，按图纸及工艺要求进行水柜下锥壳的钢筋绑扎和混凝土浇筑、养护。待下锥壳混凝土强度达到设计强度的 85%，方可在其内部面层上搭设水柜上锥壳支撑及模板体系，经验收合格后进行上锥壳的钢筋绑扎和混凝土浇筑及养护，之后拆除水柜内部模板及支撑体系，再进行水柜内部防水构造措施施工处理。

3.2 模板支撑布置

在托架的矩形钢管上满铺 50 mm 厚木板，根据下锥壳壳体母线的斜度，从下环梁边缘开始向外满堂搭设扣件式钢管支撑架，立杆钢管按纵向 0.8 m，横向 0.8 m，步距 1.2 m 布置，且尽量布置到工字钢主梁上；距离立杆底部 0.2 m 搭设扫地杆，在架体外侧周边及内部纵、横向每 5 跨，由底至顶设置连续竖向剪刀撑，剪刀撑宽度同为 5 跨，中环梁下的立杆顶部下与竖向剪刀撑交点处设置水平剪刀撑。

下环梁施工完毕后进行水柜模板安装搭设。水柜模板采用长度为 2.0 m，宽度为 25 cm，厚度为 20 mm 的木模板作为骨架，在下锥壳模板外侧钉 60 mm × 100 mm 矩形木背枋作为龙骨以加强模板刚度，木背枋后采用双钢管作为主楞支撑，且在下锥壳矩形木背枋外部竖向分层用 8 道 $\varnothing 14$ mm 抗拉强度为 1 870 MPa 油性钢丝绳拉紧，下部 5 道

钢丝绳竖向间隔不超过 0.5 m，上部 3 道钢丝绳竖向间隔不超过 0.8 m。

3.3 混凝土浇筑

水柜壳体的钢筋按规格、型号在下部场区加工完毕后，吊运至水柜模板处按图进行绑扎。

水柜壳体分两部分进行混凝土浇筑，第一部分浇筑下锥壳及中环梁部位，分 3 次浇筑，每次浇筑高度为下锥壳及中环梁总高度的 1/3，下锥壳体混凝土浇筑过程中，采用斜面堆积法施工，加强浇筑过程中的振捣和斜面抹平，确保下锥壳体里表面的斜度及表面平整度。待下锥壳体混凝土强度达到设计强度的 85% 后，且上锥壳模板支撑及钢筋绑扎验收合格后，方可进行第二部分上锥壳和上环梁部位的混凝土浇筑，钢筋绑扎和模板安装如图 5、6 所示。



图5 下锥壳水柜钢筋施工



图6 上锥壳水柜模板施工

两部分混凝土浇筑过程中，均要保证连续作业，一次成型，不留施工缝；沿着圆心对称、同向浇筑，每层浇筑高度宜在 300 ~ 500 mm 为宜，振捣密实，且做好混凝土的保湿养护工作。

3.4 防水处理

水柜内迎水面的防水粉刷做法共分为 5 层，具体做法如下：

第一层:刷防水水泥浆厚度 $2\sim 3\text{ mm}$ (50 kg 水泥掺量1 kg 防水粉);

第二层:第一层完后即抹水泥砂浆,厚度 5 mm (水泥和粗砂质量比为 $1:2$),要求压密,待砂浆初凝后将表面扫成条纹;

第三层:第二层凝固后刷防水水泥浆,做法同第一层;

第四层:第三层完后,即抹防水砂浆,厚度 8 mm ,配比同第二层,要求抹压两次;

第五层:刷防水水泥浆,与第一层同,紧接第四层进行,要求压实抹光。施工防水层时不得留施工缝,防水层的厚度不得超过 20 mm 。

3.5 安全管控措施

(1) 强化材料的入场检验和操作人员的岗位资格。材料构件全部检验合格后方可入场应用,型钢三角托架与筒身的预埋件焊接质量进行三检制;高空焊接和架体搭设人员需有相应的特种作业证书,方可作业。

(2) 优化方案的交底。应用BIM技术,以三维模型可视化的方式对工人进行安全技术交底,使其充分理解方案的技术参数,直观展示方案细节,提升交底的质量和效率。

(3) 抓好班组长这个带头人。施工现场管理人员不可能实时在线管控,班组长显得尤为关键,他对于班组工人的操作技能、身体状态、工作态度等都比较熟悉,由他对水柜高空施工现场的操作工人进行安全管控,相关措施能够落地,发挥班组长“第一责任人”的作用明显。

(4) 强化构造措施。在筒体结构 34.8 m 及 35.8 m 标高预埋钢板位置筒身内侧采用钢管进行顶撑加固,避免上部水柜施工过程中,斜支撑对筒身造成损伤。在环托梁布置的工字钢锚固段采取防止被拉出的锚固措施。型钢三角托架外围临空侧采用钢管架体进行安全防护。

(5) 加强施工过程中监控监测,重点关注混凝土浇筑期间托架工字钢悬臂端竖向位移、伞形拉结钢丝绳的绷紧程度等。

(6) 加强施工现场以“智慧工地”建设为代

表的信息技术应用。在水柜顶部外围防护架体设置 360° 全景摄像机进行视频实时监控,强化水柜施工过程的安全质量管控,提高项目精细化管理水平。

4 结 语

采用型钢三角托架结合满堂支撑架原位现浇方式进行倒锥壳形水柜施工,施工期间项目未发生安全事故,且建造速度得到了业主的好评,应用至今2年有余未发生任何渗漏,应用该方案进行倒锥壳形水柜施工,可有效提高施工质量、降低施工难度、节约工程工期、减少建造成本,且型钢三角托架的相关工字钢、钢管等构件仍可以在其他项目的施工措施用材方面进行周转应用,综合效益较好。同时应注意该方案在同类工程中应用,要强化施工过程的安全管控,加强现场特种作业人员资格证书核实和安全技术交底工作,保证托架关键节点的焊接质量,重视施工过程中监控监测,增强对混凝土浇筑顺序和高度的控制,以保证工程顺利实施。

参考文献:

- [1] 熊学文. 大容积倒锥壳水塔设计与施工[J]. 有色冶金设计与研究,2018,39(1):17-19.
- [2] 曲成平,杨苏春,王卫国等. 安哥拉某倒锥壳水塔高空现浇水箱施工技术[J]. 施工技术,2013,42(15):78-80;84.
- [3] 白兴海. 倒锥壳保温水塔水柜悬架高位现浇施工技术[J]. 山西建筑,2014,40(36):98-99.
- [4] 常效中. 1 500 m³ 事故水塔施工要点例析[J]. 建筑,2013(22):70-71.
- [5] 任发亮. 钢筋混凝土倒锥壳水箱提升施工工艺[J]. 水泥工程,2021(1):78-79;92.
- [6] 王文涛,王兴强. 预制钢筋混凝土倒锥壳水塔多开孔环板的设计[J]. 工程建设,2006(2):34-37.
- [7] 建筑施工模板安全技术规范:JGJ 162—2008[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2008.
- [8] 钢结构设计标准:GB 50017—2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2017.