

# 水工高精混凝土施工技术创新与实践

周厚贵

(中国能源建设集团有限公司,北京 100029)

**[摘要]** 本文以三峡工程升船机中的高精混凝土施工为背景,阐述了水工高精混凝土的涵义、施工技术要点以及施工实践。详细介绍了三峡升船机高精混凝土施工的主要精度控制标准、高精度测量技术、高精混凝土施工技术和混凝土形体检测结果。

**[关键词]** 高精混凝土;施工技术;三峡工程;升船机

**[中图分类号]** TU74 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)09-0004-05

## 1 前言

混凝土由于具有原材料易于获取、外形可塑、施工简便、成品敦实、坚固耐久等诸多优点被广泛应用于各类水工建筑物中,已有100多年历史。然而,在如此悠久的发展与应用历程中,却不曾有过的“混凝土”与“高精”(高等精度)的融合,甚至迄今也依然有人会认为“混凝土”与“高精”原本就是不能合在一起说的事,将“水工混凝土”与“高精”相融合是一种“妄谈”。这也难怪,混凝土自诞生以来就被人们当成一种粗制的、毛糙的、可随意配的土工类材料。

随着水利水电工程科学技术的迅猛发展和飞速进步,加之包括长江三峡工程在内的一批国家重大、特大型工程建设的迫切需要,水工混凝土的设计与施工理念已产生了巨大的升华。如今,水工建筑物在成功突破大坝大体积混凝土(如三峡三期大坝混凝土等)无裂缝难关之后,又胜利攻克高精混凝土重大施工技术难题,并在水工建筑物(如三峡升船机等)建设中成功地实施,打破了长期以来水工混凝土在人们心目中的传统观念,创造了水工混凝土发展史上的新的奇迹。为此,本文就水工高精混凝土的技术创新给出其涵义、施工技术要点以及工程实践。

## 2 高精混凝土的涵义

对于水工混凝土来说,“高精”是一个全新的理念和标准。它是指以水工混凝土施工为实施载体,在混凝土生产、运输、浇筑、护理等每一个环节,为满足高等精度要求、应用高度精湛的技术和高度精细的工艺,制造出高档精致的混凝土成品。由于实现上述要求和目标最关键的要素是人,所以实施的大前提是:必须将高精混凝土升华为理念。高精混凝土的要义,远不是把混凝土认真地浇筑好那么简单,它是整个混凝土施工“一条龙”系统的协同集成与整体提升,由全部环节和过程所产生的对所有结果的高精需求和要求,构成行为准则,形成了高精混凝土的理念。

高精混凝土理念的寓意是丰富而深刻的,但站在狭义和直观的角度上,高精具有等级的要义,就好比旅游饭店行业中的“星级”。换言之,高精混凝土的理念除了包含混凝土成品本身的“星级”,还包含着建造施工的“星级”(或高精施工)以及相关的一切思想活动、人员行为和事物活动的集合。下面就从高等精度、高度精细(精湛)、高档精致等方面具体加以阐述。

### 2.1 高等精度

与普通的水工混凝土相比,水工高精混凝土对

**[收稿日期]** 2013-07-02

**[作者简介]** 周厚贵(1962—),男,湖北枝江市人,教授级高级工程师,博士生导师,从事水电工程施工技术与管理研究;E-mail:hougui@cggc.cn

于精度等级的要求有明显的提高,这就从表观或外构上形成了严格的控制。普通的水工混凝土建筑结构施工,精度要求通常在厘米的量级上,而高精混凝土的精度要求则提高到了毫米量级,相比之下高出了一个量级。这一精度量级已达到水工结构中普通金属结构构件加工的精度要求,因此,从某种角度上可以说,就是把混凝土浇筑当作精加工的金属结构构件来制作。

以三峡工程升船机的高精混凝土施工为例,结构钢筋的安装精度如在筒体纵导向、平衡重、齿条等二期金属结构埋件部位,所要求的允许偏差为 $\pm 5$  mm,而普通水工混凝土钢筋的允许偏差为1~2 cm。结构形体的精度要求为:混凝土垂直度的允许偏差 $\pm 8$  mm,截面允许偏差(-5,+8)mm,轴线允许偏差 $\pm 5$  mm,而普通水工混凝土结构形体要求截面尺寸允许偏差为2 cm。其他如测量精度、模板加工及安装精度、金属结构埋件安装精度等也都相应成10倍地提高。

## 2.2 高度精细(精湛)

水工高精混凝土大幅度提高的精度要求必然引发施工方法和工艺的变革性改进,这就从工艺流程上形成了全过程控制的高度精细。它一方面是在工艺操作的流程节点上,为提高精细程度而增添必要的作业工序,如工件或部位交接后实施适当的再处理、将混凝土平仓和振捣工序严格地分开操作等;另一方面是在单项工艺操作的过程中,严格按照工艺操作规程,充分保障操作持续时间的“饱和度”,使该项工艺达到“饱满成熟”的程度。

在三峡工程升船机高精混凝土施工中,仅浇筑工序就细化或增加了多道工艺操作,形成了更加周密的工艺细节并加以节点控制,如混凝土浇筑前仓面设计中的责任细化;现场仓面设计交底与岗位责任落实;气象信息定时更新;在仓面物体甚至是每一根竖向钢筋上标示出混凝土坯层线及收仓线;混凝土下料前将溅在模板面上的浆液用布巾擦拭干净;对入仓的每一车混凝土进行异常情况检查等。其他各道工序的工艺操作也都相应细化到位。

## 2.3 高档精致

水工高精混凝土无论是其内在质地,还是其外在形体都具有高度的一致性;无论是在视觉、感官方面,还是在各项性能指标方面,都要远远高于普通的水工混凝土,这就从混凝土成品的功能目标上满足了高精品质,最终形成了高精产品。从外在的

表象上,高精混凝土平展、光滑、轮廓尺寸准确、色泽均匀,无表面瑕疵,给人以精致的表观。从内在的特性上,高精混凝土各项物理力学指标满足设计要求,坚固性、抗渗性、耐久性等各项性能良好,结构功能发挥优异。

## 3 施工技术难点

### 3.1 施工测量

三峡工程升船机高精混凝土结构测量精度允许误差要求在2~10 mm。放线、埋件测量、立模验收的精度远远高出水工建筑物常规混凝土精度要求,测量精度控制难度很大,具体体现在a.数量级从常规混凝土的20 mm变化到现有的2~10 mm。b.高薄壁型塔柱结构受温度、风力及自重影响发生变形,变形值的大小对结构尺寸的控制带来难度,同时,受筒体结构及周边地形影响,对测量工作的实施带来很大的难度。主要体现在:一是靠船厢室侧通视困难,确保精度的测量转点工作大;二是高空作业部位结构埋件的测量定位难度大,需要借助辅助设施来完成,比如吊机、测量平台等;三是为确保混凝土精度,对同一部位采用不同的测量方法及手段进行检校工作量大。

### 3.2 钢筋安装

为满足后续埋件施工要求,对筒体纵导向、平衡重、齿条等二期金属结构埋件部位的钢筋安装精度提出较高的标准,允许偏差仅为 $\pm 5$  mm,尤其是螺母柱部位钢筋,需要按埋件定位精度精确定位。其精度要求远高于常规钢筋允许偏差的10~20 mm(保护层处的钢筋允许偏差为保护层厚度的0.25倍,一般钢筋的保护层为50 mm)。塔柱仓位含筋量最高达25.4%(常规混凝土仓位含筋量为15%左右),安装如此大量钢筋的同时还需确保钢筋埋设精度要求,其难度极大,钢筋在原材料、钢筋加工环节达到要求的同时,还要严格控制安装精度。

### 3.3 模板施工

升船机塔柱混凝土垂直度偏差以 $\pm 8$  mm为限差,截面偏差以(-5,+8)mm为限差;轴线偏差以 $\pm 5$  mm为限差,此精度要求远高于普通大体积混凝土轴线位置偏差1 cm、截面尺寸偏差2 cm的要求,且船厢室段塔柱建筑高度146 m,如此大的高差,达到此施工精度标准的难度更大,对模板的要求也就更高。一般而言,常规的普通小钢模采用人工架立,安装速度慢,费工费力,外观质量差、施工精度

难以满足设计要求。升船机塔柱要达到美观、精确、快速施工的目的,宜采用整体大型模板施工。

### 3.4 混凝土浇筑

塔柱混凝土结构面成形后的垂直度偏差以 $\pm 8$  mm为限差,截面偏差以 $(-5, +8)$  mm为限差;轴线偏差以 $\pm 5$  mm为限差。塔柱结构混凝土结构面要求平整光洁,曲面连续均匀光滑,混凝土表面颜色要求均匀一致,无污痕、无错缝陡坎。混凝土结构上预留的孔洞、沟、槽等表面要求平整光洁、边角平直。同时塔柱内楼板、梁等顶面面层浇筑时抹平,保持清洁,表面颜色均匀一致,顶面轮廓边线分明、平直。

### 3.5 混凝土养护与保护

塔柱为高层薄壁结构,受外界环境温度影响较大,混凝土温升较快,当温度达到峰值后迅速回落,温降又较快。针对此情况,必须专题研究适用于薄壁混凝土结构的温控及养护措施。

## 4 施工技术要点

### 4.1 高精度测量

1)采用高精度的测量仪器。为了最大限度地控制好高精混凝土的形体偏差,在结构放样、模板验收测量的过程中,应选择精度匹配的高一等级的测量仪器和设备。

根据垂直升船机建筑物施工的精度要求,为了有效地控制混凝土的形体偏差,测量仪器主要采用TCA2003全站仪(标称精度:测角 $0.5''$ ,测距 $1\text{ mm}+1\text{ ppm}$ , $1\text{ ppm}=10^{-6}$ )和NET05全站仪(标称精度,测角 $0.5''$ ,测距 $0.8\text{ mm}+1\text{ ppm}$ )。垂直投影采用激光天顶仪,垂直投影标称精度 $1:200\,000$ 。在测量方法上,常规混凝土仓面平面和高程基准传递通常是在仓内架设全站仪通过边角交会或直接利用施工控制网点放点方法进行;而三峡升船机因内置埋件要求精度极高,加之结构混凝土薄、钢筋密,仓面无法架设仪器,故通过反复试验,将天顶仪投点平面基准传递法和光电测距高程基准传递法应用于混凝土及内置埋件施工测量,确保了混凝土浇筑及内置埋件施工质量。

2)设置多个施工控制网点。施工测量控制采用逐级布置、分步控制的方案。升船机布设专用和局部平面控制网。利用升船机周围现有的地形条件,在离升船机 $200\text{ m}$ 范围内( $200\text{ m}$ 内放样、验收精度可控制在 $\pm 3\text{ mm}$ )尽可能地布设多的施工控制网

点,一部分可以作为直接架设测量仪器的测站点;另一部分可以作为测站的校核基准点。三峡升船机在 $200\text{ m}$ 范围内共布设了施工网点 $14$ 个。

3)采用多种测量方法进行结构测量。混凝土测量验收的常规测量方法是通过在施工控制网点或仓内架设全站仪只采用极坐标法就能完成所有的测量工作;三峡升船机因结构埋件多且精度要求高,故将极坐标法、综合测量法、小钢尺量测法分别用于仓面混凝土结构线放样测量、垂直度测量、截面尺寸测量和混凝土形体数据测量中,实现了混凝土浇筑结构精度控制。

一般混凝土套管内置埋件测量因其精度要求不高,采用的常规测量方法是直接采用全站仪测量管口上下左右 $4$ 点坐标计算管子中心坐标即可;三峡升船机因单根和根与根之间的相对精度都要求高,故单根套管空间定位测量采用了直接测量、间接测量、投测传递法 $3$ 种方法;每组套管相对空间定位运用了绝对对比法和相对对比法;实现了内置埋件精度控制。

4)模板测量验收采用初调、精调方式。在模板、预制(埋)件安装完成后,进行空间位置和形体轮廓的检测,以确定结构物的立模形体精度是否满足设计要求。在模板检查验收过程中,测量人员可以实时指导模板安装人员进行精细调整,直到所有模板都符合设计要求的限差。

模板验收测量分两步进行,一是直接利用全站仪进行模板初调;二是利用激光天顶仪采用投测方法进行模板终调。测量精度与施工放样精度相同,平面点位中误差最大不超过 $\pm 3\text{ mm}$ ,高程中误差可控制在 $\pm 5\text{ mm}$ 以内。常规模板验收采用全站仪一次验收完成,模板安装精度控制不高。

### 4.2 混凝土施工

1)优选采用布料均匀、连续、可左右回转 $360^\circ$ 的自升式布料杆浇筑混凝土。根据升船机塔柱薄壁、含筋量高、框架结构特点,改变常规水工混凝土采用垂直起吊手段挂罐浇筑的方式,首次将布料杆应用于水工建筑物混凝土浇筑。在船厢室段每侧两个电梯井内分别布置 $1$ 台 $38\text{ m}$ 臂长和 $1$ 台 $32\text{ m}$ 臂长的仓面布料杆,混凝土采用仓面布料杆配HBT60型混凝土泵和HBT80型高压混凝土泵入仓,以满足混凝土布料均匀、连续,较好地控制坯层厚度及坯层覆盖时间等要求。

2)研制异形钢筋加工检测平台,采用型钢样架

以及测量定位技术控制钢筋安装精度。a. 由于塔柱为薄壁钢筋混凝土结构,内部布置了多个竖井,部位集中、结构复杂且钢筋布置密集,各种形状钢筋交叉布置,且与金属结构埋件交替施工。钢筋加工精度不高,将造成现场钢筋穿插、绑扎困难;为控制各种形状钢筋加工精度,自主研发新型钢筋加工检测平台装置。在平台上设置各种角度标准靠桩及标准靠尺,检验钢筋长度及弯折角度的精度。具体为根据钢筋尺寸在平台上按1:1比例放样,在转角控制点部位设置100 mm高 $\phi 20$  mm圆钢立桩或角钢靠尺,立桩、靠尺与平台点焊,将加工成形的钢筋放在平台上,以立桩、靠尺来检验钢筋相应控制点的加工精度。可准确、快速地检测各种形状的钢筋加工精度,一种型号的钢筋检测完后,可将立桩、靠尺撤掉,按照需要检测的钢筋尺寸重新定位点焊,可重复使用。这一方法显著提升了检测精度。b. 升船机塔柱金属结构一期埋件多,精度要求高,需与钢筋穿插施工,因此需确保钢筋安装精度。常规钢筋安装时采用钢筋作为样架筋,在样架筋上画点确定钢筋绑扎位置控制钢筋间排距,采用常规的定位方法,存在钢筋定位不准、垂直度偏差大、钢筋间排距和保护层控制精度低等问题。为确保钢筋定位精确,研发了在墙体内设置钢筋精确定位(样架)装置,其方法是采用型钢作为钢筋样架,在仓内按照合适间距预埋设竖向定位型钢,然后采用纵向型钢将竖向型钢两两连接,按照钢筋定位样架提供的准确位置进行钢筋安装施工。

3)首次采用可一次定位、连续上升、施工缝面少的液压自升式爬升模板,研制了门洞等特殊部位锚固系统以及模板限位装置。a. 升船机塔柱采用可一次定位、连续上升、施工缝面少的液压自升式爬升模板。电梯井等小结构部位采用钢面板,其余部位均为芬兰面板配多卡木工字梁。对于塔柱外侧结构仅1.0 m空间狭窄部位设计了专用窄边液压自升式模板;电梯井等小断面竖井结构,设计了专用异形钢模板和相匹配的爬架系统,可确保整个竖井模板系统整体爬升;为便于脱模,在模板上设置了封缝T形板和合页式转角模板。b. 爬模锚固系统锚锥安装遇预留孔时,利用钢筋网、钢板固定加长B7螺栓;遇门洞时,采用井字形钢梁设置高强螺栓作为爬模锚固点。解决了常规遇门洞等结构时模板需更换、施工时间长、模板间接缝质量难以保证的

问题。c. 研制一种可调锁口钢支撑,可双向限制模板上口位置;转角定位采用自行研制的可焊套筒锚固件。解决了常规在模板上口使用拉条单一限位方式以及转角部位采用拉条难以保证模板固定质量问题。

4)针对升船机高层建筑物及人工骨料特点,研发高性能、高泵送混凝土技术。a. 塔柱混凝土均为高强度等级混凝土,骨料为人工骨料,泵送高度达112 m,为确保混凝土和易性,满足泵机可泵性要求,随着泵送高度的增加,经多次研究和试验,对混凝土级配进行适时调整。先后研制使用了小石:中石=70:30二级配混凝土、中石粒径为20~30 mm的二级配混凝土、一级配混凝土浇筑塔柱暗柱暗梁钢筋密集部位,确保人工骨料混凝土能够连续泵送112 m高度,解决了人工骨料混凝土泵送困难问题。b. 针对薄壁混凝土钢筋密集、混凝土浇筑易污染钢筋问题,经过多次试验,确定了压力风枪处理钢筋污染方式。在混凝土下料过后及时跟进采用压力风枪对钢筋污染进行清理,消除了常规混凝土浇筑完后采用人工处理难度大、处理质量低的问题。

5)研究并实施薄壁混凝土施工综合温控技术。a. 冷却水管间排距精细布置,高温季节将冷却水管层间距布置由原来的1 000 mm改为750 mm布置,3 m升层的浇筑仓位,第一层直接铺设在仓面上;第二层布置在浇筑层中间高程;第三层布置在距收仓面300 mm左右位置。通水回路根据墙体厚度独立设置,根据不同位置的温度变化情况,调整通水流量,进行个性化通水。避免了常规冷却水管布置间距大、混凝土内部温度易超标的问题。b. 根据不同时段、不同部位采用了保水保湿、流水、养护剂养护多种措施,其中收仓面覆盖棉毡保水保湿养护,侧立面挂花管流水养护,对于受其他作业干扰不能采用流水养护的侧立面,则采用涂刷养护剂养护。解决了常规养护措施单一、养护不到位的问题。

### 4.3 实施效果

1)形体检测。三峡工程升船机塔筒高精混凝土形体跟踪检测的成果统计见表1。

从表1可以看出,塔筒混凝土形体偏差平均合格率均在99.5%以上,表明结构形体精度控制优良,筒体各项变形均处于高度受控状态。

表1 塔筒混凝土形体检测结果统计表

Table 1 Physical test results for tower concrete

项目	轴线	垂直度	截面	平整度
实测点数	2 255	2 680	2 798	2 683
合格点数	2 255	2 672	2 785	2 682
最大偏差/mm	5	12	-10~+15	6
合格率/%	100	99.7	99.5	99.9

2)混凝土密实性检查。为评判升船机塔柱结构混凝土浇筑质量,对升船机结构受力的关键部位,包括齿条、螺母柱、纵向导轨、平衡重导轨和纵向联系梁等部位的混凝土浇筑质量进行超声波检测,检测方法为超声波斜对穿CT(Computed Tomography)。共进行超声波检测307个部位,结果显示,合格率100%,优良率达95.3%。

## 5 结语

水工高精混凝土已随着重大工程建设的需要和科学技术的进步与发展应运而生,三峡工程升船机高精混凝土施工的实践证明,水工混凝土完全能够将土工材料的诸多优点带入高精领域,去建造美观、实用、耐久、精致的水工建筑物,为人类造福。

高精混凝土施工的精要在于高精理念指导下的精湛技术和精细工艺的展宽、细化与足量,而精要中的关键又在于精细工艺每一个细枝末节的不折不扣与足额到位,如果抓不住这个关键,再精妙的设想也只是一句空话,甚至还会带来相背的结果。由此可见,高精混凝土给水工混凝土施工领域带来的将是一场巨大而深刻的变革。

# Innovation and practice of construction technology on hydraulic high-precision concrete

Zhou Hougui

(China Energy Engineering Group Co. Ltd., Beijing 100029, China)

**[Abstract]** Based on the background of high-precision concrete construction in Three Gorges Project ship lift, the meaning of hydraulic high-precision concrete and its construction techniques and construction practices are expounded in this paper. The main accuracy control standards, high-precision measurement technology, high-precision concrete construction technology and concrete physical test results of the high-precision concrete construction of the Three Gorges Project ship lift are introduced in details.

**[Key words]** high-precision concrete; construction technology; Three Gorges Project; ship lift