

三峡升船机塔柱横梁支撑系统设计

朱俊杰, 李士华

(中国葛洲坝集团股份有限公司三峡分公司, 湖北宜昌 443002)

[摘要] 本文介绍了三峡升船机塔柱横梁混凝土施工支撑系统的实施方案, 从贝雷架支撑体系所承受荷载要求、结构强度要求以及变形稳定性要求出发, 通过科学计算制定出合理的贝雷架支撑系统的支座系统设计方案、结构设计方案以及上部钢管排架设计方案, 并对贝雷架支撑系统以及相应的塔柱混凝土墙体结构在混凝土浇筑前后以及混凝土浇筑过程中的应力(应变)、变形、位移进行了监测。监测结果表明, 横梁支撑系统满足了横梁浇筑支撑要求, 施工质量优良, 安全可靠, 设计与施工方案可行。

[关键词] 升船机塔柱; 横梁; 贝雷架; 支撑系统; 三峡工程

[中图分类号] U642 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2013)09-0064-06

1 前言

三峡升船机船厢室段塔柱结构, 顶部由两个平台和7根横梁形成塔柱的横向联系, 其中两个平台部位各有两根横梁和两根纵梁, 两根横梁之间布置了5根次梁。在横梁两端沿流向各布置了1根基础梁将11根横梁连成整体。横梁一端设计有宽槽后浇带, 另一端设有竖向施工缝。单根横梁两端布置了牛腿结构, 横梁牛腿结构以及纵梁与塔柱一起浇筑, 横梁中间部分、基础梁以及两个平台部位在后续时间一次全部浇筑完成。纵梁尺寸为 $19.1\text{ m}\times 1.5\text{ m}\times 7.25\text{ m}$ (跨度 \times 宽度 \times 高度), 横梁最大尺寸为 $25.8\text{ m}\times 2\text{ m}\times 2.75\text{ m}\times 7.15\text{ m}$ (跨度 \times 宽度 \times 中部高度 \times 两侧高度)。横梁梁系结构见图1。

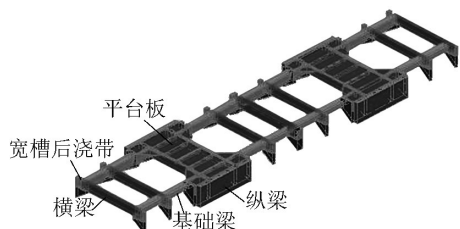


图1 升船机顶部横梁梁系结构图

Fig.1 Beam structure at the top of the ship lift

横梁梁系布置高度高(距地面达145 m), 跨度大, 高宽比大, 现场施工设备布置仅有船厢室段建筑塔吊, 起吊重量有限, 且筒体为薄壁混凝土结构, 对混凝土施工的支撑结构要求高, 横梁支撑结构设计难度大、风险大。

2 塔柱横梁贝雷架支撑方案

2.1 贝雷架简介

最初的贝雷军用钢桥是由英国工程师唐纳德·西·贝雷(Donald Coleman Bailey)在1938年第二次世界大战初期开始设计。他的设计概念为利用易于得到的一般中型卡车进行运输, 利用非熟练工人以人力进行搭建, 同时以最少种类的单元构件拼装成能够承受各种不同荷载、具有不同跨径的桥梁。战后, 许多国家把贝雷军用钢桥经过一些改进后转为民用。如今, 贝雷钢桥在国防交通工程保障、抗震救灾、抗洪抢险、联合国维护行动中起到不可替代的作用。

贝雷架是采用Q345型钢制作而成的, 它由上下弦杆、竖杆、斜杆等拼装而成。弦杆由10号槽钢组成, 腹杆系由8号工字钢组成。端竖杆和中竖杆上的规形孔为横梁夹具孔, 是用来安装横梁夹具的, 横梁夹具能起到稳定横梁的作用。贝雷架的配件有贝雷销、桁架螺栓、弦杆螺栓、撑架螺栓, 其中

[收稿日期] 2013-06-28

[作者简介] 朱俊杰(1985—), 男, 湖北崇阳县人, 助理工程师, 主要从事水利水电工程施工技术研究; E-mail: 1255348817@qq.com

贝雷销具有连接桁架的作用。贝雷架的构件有桁架、450 支撑架、900 支撑架、加强弦杆,其中加强弦杆具有提高弦杆的抗弯能力以及充分发挥桁架腹杆抗剪能力的作用。

贝雷架节与节之间采用贝雷销连接加长形成排,排与排之间采用支撑架(连接杆)连接形成组,组与组之间以及单排与组之间采用支撑架(连接杆)连接形成整体(樑)。根据贝雷架的受力情况,可将其设计为双层结构,两层之间采用桁架螺栓连接。

贝雷架标准节长为 300 cm,宽为 17.6 cm,高为 150 cm,单节质量为 270 kg。根据塔柱的结构设计要求以及受力情况,除使用标准贝雷架以外,另需加工长分别为 150 cm、90 cm 的非标准贝雷架以及 8 孔 1350 支撑架、3 m 高抗剪桁架单元、1.5 m 加强弦杆、900 加强弦杆、450 联板、225 联板等设施。贝雷架标准节见图 2。

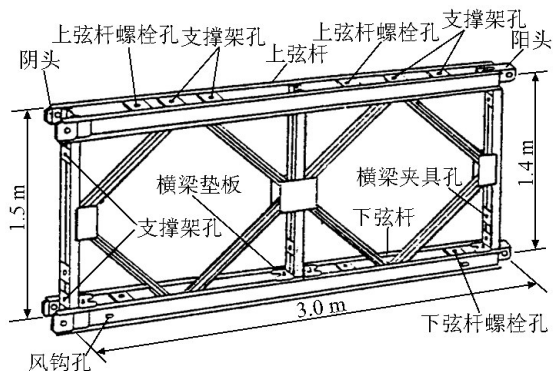


图 2 贝雷架标准节示意图

Fig.2 Schematic of standard section of Bailey rack

2.2 横梁贝雷架支撑方案

横梁混凝土结构特殊,对外观质量要求高,施工时为高空作业,受起吊能力、技术要求限制,经综合分析比较,决定采用贝雷架(贝雷梁)支撑方案。即在塔柱墙体预埋贝雷架支座埋件,后期支座与预埋埋件连接安装形成贝雷架支座,贝雷架坐落在支座上,则可以在贝雷架上搭设钢管支撑排架以及安装横梁模板,贝雷架上部施工荷载通过贝雷架传递到支座以及塔柱混凝土墙体。在对施工荷载进行计算后可以对贝雷架进行布置,196.00 m 高程上单个横梁结构支撑贝雷架的最小质量达 36 t,最大质量达 78 t,因而应采用大吨位的起重设备整体吊装到位。升船机横梁贝雷架提升高度可达到 150 m,而现场起重设备布置场地狭窄,不具备实施条件。由于

现场建塔起吊能力不能满足单根梁贝雷架的整体吊装要求,故采取将单个横梁部位的贝雷架分成若干个起吊单元,然后在空中连接形成整体的施工方案。

3 贝雷架支撑系统设计参数

3.1 支撑体系设计荷载

贝雷架支撑系统的设计荷载包括。a.贝雷架支撑体系自重。b.混凝土梁自重。c.施工人员和施工材料、机具等荷载。d.现浇砼梁底部模板系统材料(贝雷架以上)重量。e.荷载组合。计算强度时用荷载组合:a+b+c+d;计算挠度时用荷载组合:b+c+d。

3.2 支撑体系稳定性要求及主梁挠度

贝雷架支撑系统的稳定性要求为牛腿牢固,贝雷梁横向之间连接牢固。

根据《钢结构设计规范》^[1]和《公路桥涵施工技术规范》^[2],支撑体系主梁弹性挠度应小于结构跨度的 1/400。同时,将贝雷架支撑体系设计安全等级定为二级。贝雷架体系安装完成后的使用时间即设计基准期为 1 年。

4 贝雷架支座系统设计

4.1 支座受力分析

1)贝雷架支座的全部竖向荷载由结合面的静摩擦力传递至锚板,结合面涂无机富锌底漆,摩擦系数采用 0.4,由此可以确定高强螺栓的预紧力,根据预紧力复核高强螺栓组件中相关零件的强度。

2)支座的全部竖向荷载由剪力板传递,据此复核抗剪焊缝的强度。

3)作用于锚板的全部竖向荷载由焊钉传递至混凝土,焊钉均匀承载,由此可复核焊钉强度。

4)支座竖向荷载形成的翻转力矩由布置在支座上方的 3 排螺栓承担,最顶部的一排螺栓拉力最大。以此拉力可以复核高强螺栓组件中相关零件的强度。

整个贝雷架系统对安全性要求很高,其中支座系统的施工质量关系到整个系统的安全。考虑到现场施工难度大,设计时应增加支座系统的安全储备,即在上述支座反力的基础上乘以 1.25 倍的安全系数进行设计。

4.2 支座系统设计

贝雷架由设在塔柱墙壁外侧的牛腿支承,牛腿顶面高程为 182.00 m,牛腿与贝雷架之间设置钢结构箱梁。牛腿有两种布置方式,一种是将牛腿对称

布置在船厢室两侧的塔柱墙壁上,垂直于水流向布置。牛腿采用钢结构支座,通过高强螺栓与埋件结构连接,位于每个横向墙端面的轴线附近。另一种是将牛腿布置在塔柱凹槽内的上下游墙壁上,顺水流向布置。钢结构牛腿与埋件、箱梁及贝雷架之间的连接方案见图3。

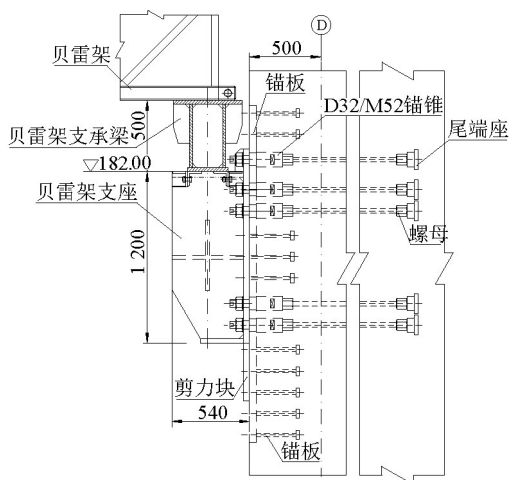


图3 贝雷架支承结构示意图

Fig.3 Schematic of support structure of Bailey rack

注:图中高程单位为m,其余单位为mm

塔柱薄壁混凝土结构受力复杂,支座布置困难。其中,纵梁与横梁形成的垂直交叉结构处在平衡重导轨的凹槽薄弱部位,牛腿采用混凝土结构,在牛腿上布置钢箱梁支撑贝雷架。其余结构部位则采用钢结构支座。

4.3 锚固

横梁贝雷架单边最大支座反力达4 830 kN,其支座埋板的尺寸高度由于受到限制只能加高至2.37 m。爬模面板上不利于开孔,在现场使用爬模的施工情况下,采用长螺栓对面板进行加固是难以实施的。经试验论证,由10级M52高强螺栓、40Cr锚锥、D32锚筋以及Q345底座组成的高强螺栓组件的最小破断拉力大于800 kN;D32高强锚筋和尾端底座的最小破断拉力大于600 kN。

埋件由锚板和高强螺栓组件构成。其中,高强螺栓组件由M52螺杆、M52螺母、52垫圈、D32/M52锚锥、M32螺母、D32高强钢筋以及尾端底座等零件组成。在每个高强螺栓组件中,窄支座布置15组,宽支座布置30组。锚板由50 mm厚钢板与25×300焊钉焊接而成,在钢板上对应于高强螺栓位置钻 $\phi 80$ mm孔。以锚锥 $\phi 80$ mm轴的台肩定位,将高强

螺栓组件中的锚锥端部 $\phi 80$ mm轴段与锚板上的 $\phi 80$ mm孔相配合。该结构形式可便于浇筑混凝土时采用滑模,并确保位于混凝土内部的高强钢筋及尾端底座等构件不承受高强螺栓的预紧力。高强螺栓组件见图4。

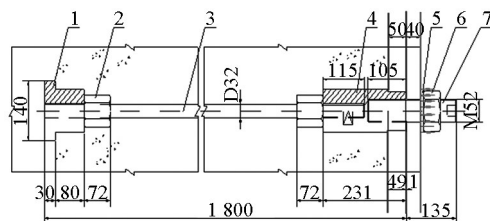


图4 高强螺栓组件图(单位:mm)

Fig.4 Diagram for bolt assembly(unit:mm)

注:图中1~7分别为尾端座、螺母、高强钢筋、锚锥、垫圈、螺母、螺杆

4.4 支座

钢结构支座通过高强螺栓与埋件连接,安装时对高强螺栓施加一定的预紧力,通过支座与埋件结合面的静摩擦力承受支座载荷。贝雷架载荷作用于支座后,高强螺栓组件将承受支座翻转力矩产生的拉力。另外,在支座底板下方设置有剪力板,用于承受支座竖向载荷,以作为结合面摩擦失效时的安全保护。支座与埋件的连接方案见图5。

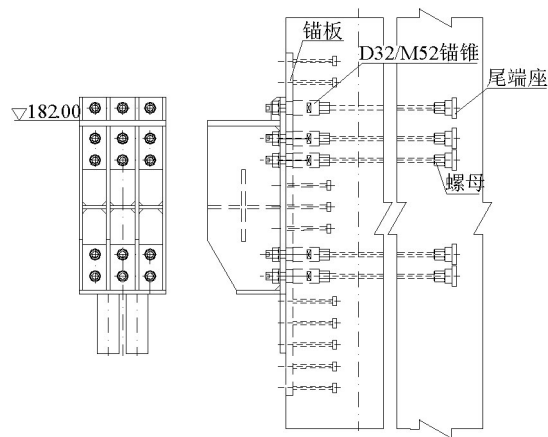


图5 支座与埋件连接方案(单位:m)

Fig.5 Connectivity solution of support and embedded parts(unit:m)

所有钢结构支座与埋件的高度尺寸分别为1 360 mm、2 370 mm;宽度有两种不同的尺寸,一种是窄支座,其宽度为625 mm;另一种是宽支座,其宽度为1 225 mm,相当于两个窄支座的连体结构。载荷最大的是第7根附近的两套窄支座。因此,当按

照窄支座的载荷条件和结构尺寸进行设计计算时，宽支座是安全的。

5 贝雷架结构设计

5.1 贝雷架荷载分析及变形计算

5.1.1 计算模型

根据现场支撑条件可以确定4种有限元结构模

型或16种有限元加载模型：模型1(见图6)、模型2(见图7)、模型3(见图8)、模型4(见图9)和模型5(见图10)。采用大型通用有限元分析软件SAP2000对钢桥结构进行三维空间有限元分析，其中，桁架弦杆、腹杆采用框架单元，桁架单元之间采用铰接连接方式。

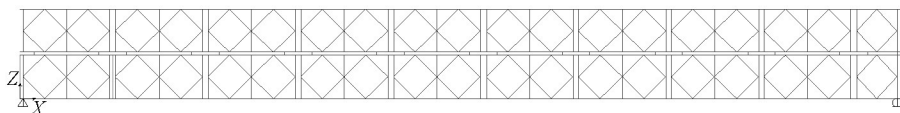


图6 桁架梁4(横梁HL7)结构有限元模型(模型1)

Fig.6 Joist 4 (beam HL7) finite element model (model 1)

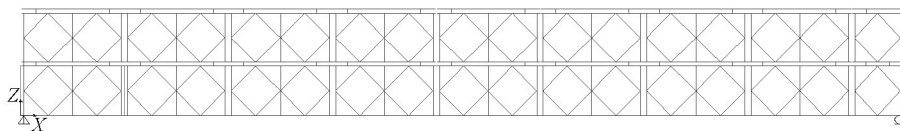


图7 桁架梁1、2、3、5(横梁HL1、HL2、HL3、HL7)结构有限元模型(模型2)

Fig.7 Joist 1,2,3,5 (beams HL1, HL2, HL3, HL7) finite element model (model 2)

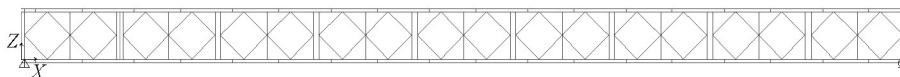


图8 桁架梁5(观光平台下横梁HL4-1)和桁架梁9(次梁)结构有限元模型(模型3)

Fig.8 Joist 5 (sightseeing platform, transom HL4-1) and joist 9 (secondary beam) finite element model (model 3)

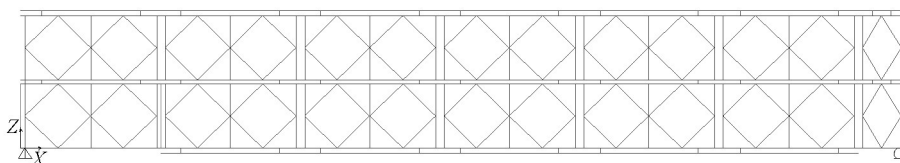


图9 桁架梁6(纵梁ZLD196-2)结构有限元模型(模型4)

Fig.9 Joist 6 (stringer ZLD196-2) finite element model (model 4)

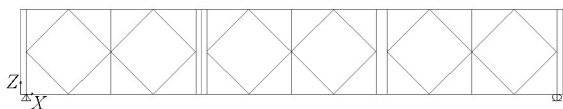


图10 桁架梁7、8(基础梁JLE196-1、6)结构有限元模型(模型5)

Fig.10 Joist 7,8 (foundation beams JLE196-1, 6) finite element model (model 5)

5.1.2 计算结果

计算结果表明，当横梁浇筑受力达到最大时，贝雷架跨中挠度均在控制范围内，桁架弦杆最大轴

压力、最大轴向拉力以及桁架腹杆最大轴压力、最大轴向拉力均符合要求。

经过综合受力分析，横梁、纵梁、平台板、施工平台贝雷架在采用以下结构的情况下是安全的：HL3、HL7贝雷架采用双层上加强且在两端采用高抗剪桁架单元的结构；平台板下的横梁、次梁、平台板贝雷架采用单层上下加强的结构；纵梁贝雷架采用双层上下加强且在两端采用超高抗剪桁架单元的结构；HL1、HL2贝雷架采用双层加强且采用高抗剪桁架单元的结构。基础梁贝雷架、辅助横梁施工

平台、辅助纵梁施工平台、辅助横梁施工平台、轨道梁贝雷架采用单层结构。

5.2 贝雷架布置

塔柱 196.00 m 高程横梁、纵梁、基础梁及观光平台(中控室)采用贝雷架+钢管排架支撑方案施工,因混凝土梁尺寸、重量不等,贝雷架承受的荷载也不一样。横梁、纵梁、基础梁及观光平台的贝雷架布置形式经研究考虑后,分单层型、单层顶部加强型、双层顶部加强型、双层上下加强型 4 种形式。加强型贝雷架采取在贝雷架上部及下部各增加 1 根并排弦杆的方式来达到增强贝雷架整体强度的目的。

6 贝雷架上部钢管排架设计

贝雷架至横梁底部的空间搭设钢管排架,用以支撑横梁模板系统,钢管采用 $\phi 48 \times 3.5$ 钢管。

6.1 荷载组合

贝雷架所承受的荷载主要包括 a. 混凝土梁自重,取 25 kN/m^3 计算。b. 施工人员及机具荷载,取 250 kN/m^2 计算。c. 现浇混凝土梁底部模板系统材料(贝雷架以上)重量。d. 振捣混凝土产生的荷载,取 200 kN/m^2 计算。Q235 钢抗拉、抗压和抗弯强度设计值取 205 N/mm^2 。

6.2 排架设计计算依据

依据《水电水利工程模板施工规范》^[3]和《建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范》^[4]的相关内容进行验算。Q235 钢抗压强度设计值取 205 N/mm^2 。

6.3 排架设计计算结果

经计算,横梁排架立杆间距为 $100 \text{ cm} \times 66 \text{ cm}$,基础梁立杆间距为 $100 \text{ cm} \times 72 \text{ cm}$,排架步距按不大于 140 cm 控制,计算结果满足要求。

6.4 排架支撑方案

排架钢管每根立杆底脚设工字钢底座,工字钢底座有 $I100 \times 68 \times 4.5$ 和 $I250 \times 116 \times 8$ 两种规格,第 2 种规格的工字钢底座用于跨相邻两横梁贝雷架部位,第 1 种规格的工字钢底座用于其余部位,工字钢底座铺设在贝雷架上,工字钢用铁丝与贝雷架绑扎固定,同时工字钢底座上部焊装有短钢筋桩,立杆套置于短钢筋桩上,以防止立杆发生侧滑。

为满足排架整体稳定性要求,排架间隔设置剪刀撑和扫地杆,左右侧基础梁底部排架设连墙杆将排架与塔柱墙面连接。在两个横梁之间布置联系排架,一是增加横梁排架的侧向稳定;二是将其作

为操作平台。排架立杆上部设 T32 支撑头和工字钢帽梁用以支撑模板。

7 贝雷架支撑系统安全监测

7.1 监测部位

根据升船机顶部横梁梁系结构施工荷载情况,选择承受荷载最大的轴 2 墙、轴 7 墙、轴 12 墙跨航槽横梁及塔柱 4 个纵梁作为监测部位,主要对其贝雷架、贝雷架支座系统在混凝土浇筑前后以及混凝土浇筑过程中的应力(应变)、变形、位移进行监测,并对相应的塔柱混凝土墙体结构进行变形监测。

7.2 监测方法

1) 贝雷架挠度监测。在监测断面贝雷架的底部中心位置粘贴上反射片,在正对贝雷架下面的 50 m 底板上刻划一位置点,用红油漆标注;在 50 m 底板位置上架设全站仪,直接测量位置点与贝雷架底部反射片之间的距离;所得到的 3 个距离之差就是贝雷架的挠度值。

2) 贝雷架侧向位移监测。在横向监测断面的贝雷架的下游张拉一根钢丝,钢丝固定在贝雷架左右两侧的墙体上,在纵向监测断面的贝雷架的左侧张拉一根钢丝,钢丝固定在贝雷架上下游两侧的墙体上;在监测断面的贝雷架侧面的两端及中心刻划 3 个点,分别用钢板尺测量点与线之间的距离,通过距离比较计算侧向变形值。

3) 贝雷架支座监测。采用在墙壁上安装托架,托架布置百分表进行监测。利用膨胀螺栓将角钢固定在梁支座周边作为支撑点,然后焊接支撑托架并将其固定牢固。横梁贝雷架两端各布置两个支座,在对应的支架上对每个支座及高强螺栓分别布置 6 个百分表进行监控。其中 6 个百分表监测支座的 X, Y, Z 三个方向位移变化,另外 6 个百分表监测高强螺栓的位移变形量。

7.3 监测结果

横梁混凝土浇筑时选取轴 2、轴 12、轴 7 横梁贝雷架支撑系统进行砼浇筑监测,监测结果见表 1。

监测结果表明,贝雷架应力、变形均在允许范围内。

8 结语

三峡升船机 196.00 m 高程横梁梁系布置高度高,跨度大,高宽比大,现场施工设备布置受限,且塔柱筒体为薄壁混凝土结构,对混凝土施工的支撑结构要求高,横梁支撑结构设计难度大、风险大。

表1 三峡升船机横梁贝雷架、排架、筒体监测结果统计表

Table 1 Monitoring results table of Bailey rack, shelving, cylinder in Three Gorges Project ship lift beam

项目	贝雷架杆件 应力值/MPa				贝雷架挠 度值/mm		贝雷架自振 频率/Hz		排架 垂直度 /mm	筒体 位移 /mm	支座及高强 螺栓/mm
	上弦杆轴 向压应力	下弦杆轴 向拉应力	斜腹杆轴 向压应力	竖腹杆轴 向压应力	竖向 挠度值	侧弯 变化值	竖向自 振频率	横向自 振频率			
允许值	—	—	—	—	+64.5	+12.9	—	—	—	20	无变形
原型试验测值	-58.3	+36.9	-79.3	-55.0	+54.5	+5	4.59	0.68	11.2	—	—
HL2测值	-43.3	+38.1	-49.0	-43.3	+29.9	+1.7	6.4	1.8	9.1	17.7/2	0.08
HL12测值	-23.8	+17.9	-28.8	-51.2	+25.1	+1.1	6.4	0.8	5.5	17.8/2	0.1
HL7测值	-25.8	+38.9	-56.2	-69.4	+28.7	+4.1	6.4	0.8	5.0	32.9/2	0.05

注:贝雷架挠度值为正数表示向下游

本文从贝雷架支撑体系的设计荷载、荷载组合出发,在满足稳定性要求的前提下,对贝雷架支撑系统的支座系统设计方案、结构设计以及上部钢管排架设计方案进行了分析计算。计算结果表明,按照上述设计方案进行施工,贝雷架的应力、变形均能满足设计要求。同时,对贝雷架支撑系统以及相应的塔柱混凝土墙体结构在混凝土浇筑前后以及混凝土浇筑过程中的应力(应变)、变形、位移进行了监测。监测结果表明,横梁支撑系统满足了横梁浇筑支撑要求,施工技术可行。本文所提出的关于塔柱横梁支撑系统的施工技术可以为今后类似工程施工提供参考借鉴。

参考文献

- [1] 中华人民共和国建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB 50017—2003 钢结构设计规范[S]. 北京:中国计划出版社, 2003.
- [2] 中华人民共和国交通部. JTG/T F50—2011 公路桥涵施工技术规范[S]. 北京:人民交通出版社, 2011.
- [3] 中华人民共和国国家经济贸易委员会. DL/T 5110—2000 水电水利工程模板施工规范[S]. 北京:中国电力出版社, 2001.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. JGJ 130—2011 建筑施工扣件式钢管脚手架安全技术规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2011.

Beam supporting system design for Three Gorges Project ship lift tower

Zhu Junjie, Li Shihua

(China Gezhouba Group Co., Ltd. Three Gorges Company, Yichang, Hubei 443002, China)

[Abstract] This paper describes the embodiment of concrete construction supporting system of the Three Gorges Project ship lift tower beams. It begins with the load requirements, structural strength requirements, and deformation stability requirements of the Bailey rack supporting system. Through scientific computing, reasonable bearing system design, structural design and the upper steel pipe bent design of Bailey rack supporting system are developed. And the monitoring of the stress and strain, deformation, displacement are done to the Bailey rack supporting system and the corresponding tower concrete wall structure around the concrete pouring process. The monitoring results show that the beam supporting system meets the pouring and supporting requirements of beams. The construction quality is first-rate, safety and reliable. Both the design and the construction are feasible.

[Key words] ship lift tower; beam; Bailey rack; supporting system; Three Gorges Project