

白鹤滩水电站地下厂房岩锚梁混凝土温控计算研究

赵修龙，万祥兵，方丹，李良权

(中国电建集团华东勘测设计研究院有限公司,浙江 杭州 311122)

摘 要:选取高温季节和低温季节两种工况,对白鹤滩水电站地下厂房岩锚梁混凝土的温度场和温度应力场进行三维有限元仿真计算分析。采取通水冷却温控措施以改善岩锚梁混凝土的温度场和温度应力场,满足岩锚梁混凝土温控要求。分析了浇筑温度、冬季保温和通水时间等措施对岩锚梁混凝土温控的影响。

关键词:地下厂房;岩锚梁混凝土;原理及依据;分析模型;应力计算

中图分类号:TV745;TV331;S624.4+4 **文献标识码:** B **文章编号:**1001-2184(2019)05-0115-05

Study on Temperature Control Calculation of Rock Anchor Beam Concrete at
Underground Powerhouse of Baihetan Hydropower Station

ZHAO Xiulong, WAN Xiangbin, FANG Dan, LI Liangquan

(Huadong Engineering Co., LTD, Hangzhou, Zhejiang, 311122)

Abstract: The temperature field and the temperature stress field of the rock anchor beam concrete at underground powerhouse of Baihetan Hydropower Station are analyzed by 3D finite element simulating calculation under the conditions of high temperature season and low temperature season. Water cooling temperature control measures are taken to improve the temperature field and temperature stress field of rock anchor beam concrete, so that to meet the temperature control requirements. The influences of casting temperature, heat preservation in winter and water supply time on temperature control of rock anchor beam concrete are analyzed.

Key words: underground powerhouse; rock anchor beam concrete; principal and basis; analysis model; stress calculation

1 工程概况

白鹤滩水电站发电厂房为地下式,电站总装机容量 16 000 MW,左、右岸地下厂房各布置 8 台单机容量 1 000 MW 的水轮发电机组,单机容量位居世界第一^[1]。该水电站地下厂房岩锚梁尺寸为 406×3×2.85 m(长×宽×高),边墙在高程 604.74 m 处呈 35°折角,外边墙在高程 603.6 m 处呈 53.47°折角,交汇于岩壁梁岩台高程 602.6 m 处。岩壁梁每隔 38 m 设一道结构缝,缝宽 2 cm。浇筑的施工缝分段长度小于 15 m。岩锚梁一期混凝土强度等级是 C30,为二级配常态混凝土。

2 计算原理及依据

2.1 温度场计算的基本原理

由热量平衡原理,温度升高所吸收的热量等于从外面流入的净热量与内部水化热之和。瞬态温度场变量 $T(x,y,z)$ 在直角坐标系求解域中满

足固体热传导基本方程:

$$a\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right) + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} = \frac{\partial T}{\partial \tau} \tag{1}$$

式中 T 为温度; a 为导温系数, θ 为混凝土绝热温升^[2]。

2.2 温度应力场计算的基本原理

混凝土在复杂应力状态下应变增量包括弹性应变增量、徐变应变增量、温度应变增量、自生体积变形增量和干缩应变增量,因此有:

$$\{\Delta \epsilon_n\} = \{\Delta \epsilon_n^e\} + \{\Delta \epsilon_n^c\} + \{\Delta \epsilon_n^T\} + \{\Delta \epsilon_n^0\} + \{\Delta \epsilon_n^s\} \tag{2}$$

式中 $\{\Delta \epsilon_n^e\}$ 为弹性应变增量; $\{\Delta \epsilon_n^c\}$ 为徐变应变增量; $\{\Delta \epsilon_n^T\}$ 为温度应变增量; $\{\Delta \epsilon_n^0\}$ 为自生体积变形增量; $\{\Delta \epsilon_n^s\}$ 为干缩应变增量^[3]。

2.3 水管冷却计算原理

采用等效热传导方程,将水管冷却的降温作用视为混凝土的吸热,按负水化热处理,在平均意

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51309243)
收稿日期:2019-07-08

义上考虑水管的冷却效果。可得混凝土的平均温度为:

$$T(t) = T_w + (T_0 + T_w)\varphi(\tau) + \theta_0\psi(\tau) \quad (3)$$

式中 T_0 为混凝土初温; T_w 为冷却水温度; φ 为考虑初始温差的函数; ψ 为考虑混凝土绝热温升的函数^[4]。

2.4 抗裂安全系数依据

混凝土的抗裂性能随着浇筑时间的变化而变化,参照《混凝土重力坝设计规范》(NB/T 35026—2014)并结合现场实际情况,要求混凝土的抗裂安全度在任意时刻满足:

$$\frac{\epsilon_p E_c}{\sigma} \geq k, k = 1.5 \quad (4)$$

式中 ϵ_p 为混凝土极限拉伸值; E_c 为混凝土抗拉弹模; σ 为任意时刻节点的应力; k 为混凝土抗裂安全系数^[5]。

3 有限元计算分析模型

3.1 计算考虑的荷载

在施工期,地下厂房岩锚梁温度场和温度应力场的计算分析主要考虑的荷载为:温度荷载、自重和混凝土徐变变形产生的荷载,不考虑围岩自重和徐变变形产生的荷载。

3.2 计算对象和网格划分

由于岩锚梁的分仓浇筑的施工缝分段长度以不大于 15 m 为宜,故选取具有代表性的 15 m 长的岩锚梁结构段及 15 m 厚的围岩进行分析,围岩和岩锚梁结构采用空间八结点等参单元,岩锚梁有限元模型示意图(图 1)。

4 高温季节浇筑工况下岩锚梁混凝土温度与温度应力计算分析

4.1 基本方案

若工程于高温季节 7 月 1 日开浇,混凝土浇筑温度取为 17℃,浇筑 7 d 后拆模,表面洒水养护 28 天。典型代表点温度历时曲线(图 2),温度应力历时曲线(图 3),可以看出在高温季节浇筑且未采取温控措施的情况下岩锚梁温度场经历了水化热温升、温降和随环境气温周期变化三个阶段,岩锚梁混凝土最高温度为 58.8℃。最大拉应力 5.11 MPa,最小抗裂安全系数为 0.79,小于 1.5,极易产生裂缝,必须采取一定温控措施。

4.2 温控方案

若工程于高温季节 7 月 1 日开浇,混凝土浇

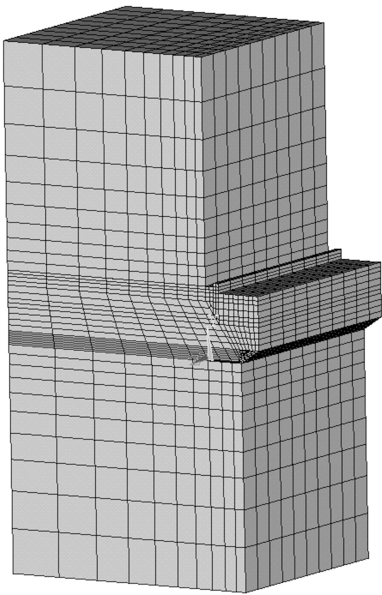


图 1 岩锚梁有限元模型示意图

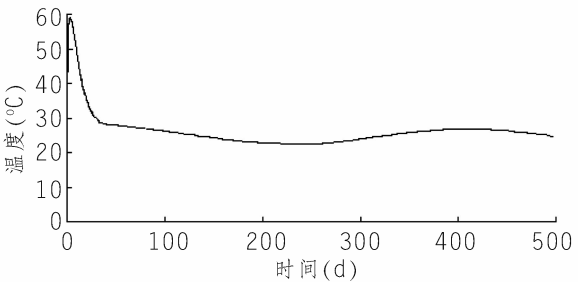


图 2 典型代表点温度历时曲线

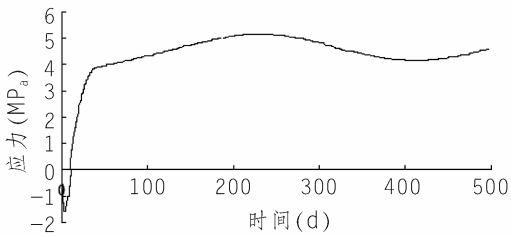


图 3 典型代表点温度应力历时曲线

筑温度为 17℃,通水冷却,水温为 15~22℃,通水时间为 15 d,通水流量为 35 L/min,冷却水管呈蛇形布置,水管密度为 1 m×0.5 m。浇筑 7 天后拆模,表面洒水养护 28 d。从典型代表点温度历时曲线(图 4),温度应力历时曲线(图 5)可以看出在高温季节浇筑并采取温控措施的情况下,岩锚梁混凝土温度场经历了水化热温升、温降、随环境气温周期变化三个阶段。岩锚梁混凝土最高温度 48.99℃。岩锚梁温度应力场经历了压应力增长、压应力减小、产生拉应力、拉应力缓慢增长、拉

应力快速增长并达到最大值、拉应力再减小、而后进入随气温周期性变化这样一个过程。最大拉应力 2.57 MPa,最小抗裂安全系数 1.53,满足温控防裂要求,故可以作为推荐温控方案。

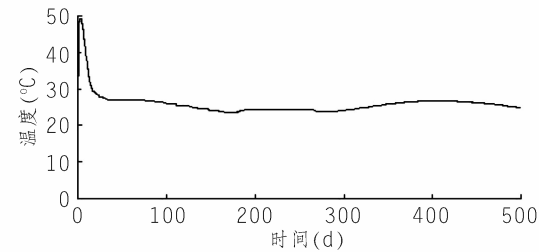


图 4 典型代表点温度历时曲线

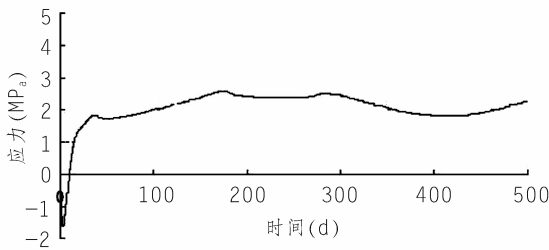


图 5 典型代表点温度应力历时曲线

5 低温季节浇筑工况下岩锚梁混凝土温度与温度应力计算分析

5.1 基本方案

若工程于低温季节 1 月 1 日开浇,混凝土浇筑温度取为 15℃,浇筑 7 天后拆模,表面洒水养护 28 d。典型代表点温度历时曲线(图 6),温度应力历时曲线(图 7),可以看出在低温季节浇筑且未采取温控措施的情况下岩锚梁温度场经历了水化热温升、温降和随环境气温周期性变化三个阶段,岩锚梁混凝土最高温度为 47.75℃。最大拉应力 2.57 MPa,最小抗裂安全系数为 1.27,小于 1.5,极易产生裂缝,必须采取一定温控措施。

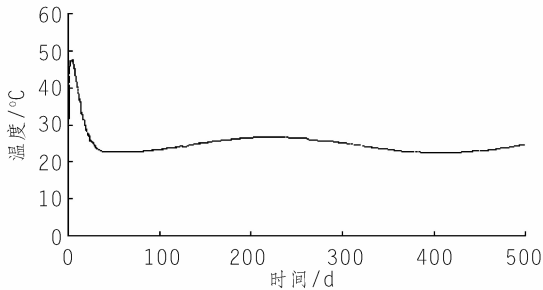


图 6 典型代表点温度历时曲线

5.2 温控方案

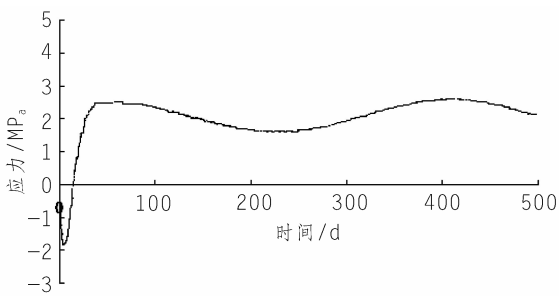


图 7 典型代表点温度应力历时曲线

初步采取的温控方案为:低温季节 1 月 1 日开浇,混凝土浇筑温度为 15℃,通水冷却,水温为 15~22℃,通水时间为 15 d,通水流量为 35 L/min,冷却水管呈蛇形布置,水管密度为 1 m×0.5 m。浇筑 7 d 后拆模,表面洒水养护 28 d^[7]。从典型代表点温度历时曲线(图 8),温度应力历时曲线(图 9)中可以看出在低温季节浇筑并采取温控措施的情况下,岩锚梁混凝土温度场经历了水化热温升、温降、随环境气温周期性变化三个阶段。岩锚梁混凝土最高温度 46.14℃。岩锚梁温度应力场经历了压应力增长、压应力减小、产生拉应力、拉应力缓慢增长、拉应力快速增长并达到最大值、拉应力再减小、而后进入随气温周期性变化这样一个过程。最大拉应力 2.51 MPa,最小抗裂安全系数 1.6,满足温控防裂要求,故可以作为推荐温控方案。

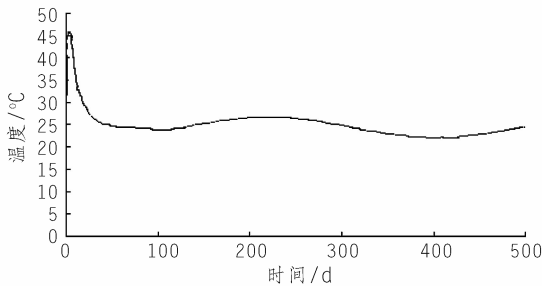


图 8 典型代表点温度历时曲线

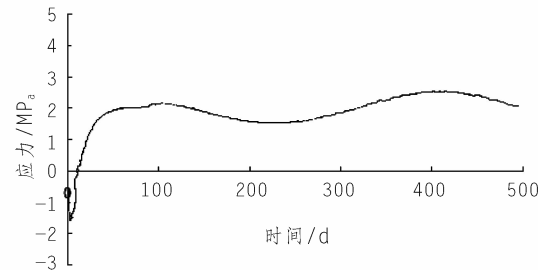


图 9 典型代表点温度应力历时曲线

6 岩锚梁混凝土温控防裂影响因素敏感性分析

选取浇筑温度、冬季保温与通水冷却时间等三个最主要影响因素进行岩锚梁混凝土温控防裂影响因素敏感性分析。

6.1 浇筑温度对岩锚梁混凝土温控防裂影响分析

计算中采取的浇筑方案条件为:高温季节开浇,浇筑7 d后拆模,表面洒水养护28 d,冬季保温90 d,通水冷却15 d。计算方案见表1。

表1 浇筑温度影响计算方案	
方案	浇筑温度/℃
方案一	20
方案二	18
方案三	17

从不同方案下典型代表点温度历时曲线(图10)温度应力历时曲线(图11)最小抗裂安全系数(表2)可以看出不同方案下岩锚梁混凝土的温度场均经历了水化热温升、温降和随环境气温周期变化三个阶段,各计算方案演化趋势基本一致。随着浇筑温度的减小,最高温度随之减小。浇筑温度从20℃到17℃,最高温度值由50.84℃减至48.99℃,减小了1.85℃,变化率为0.62℃/℃。因此,浇筑温度的变化对岩锚梁混凝土的温度场的影响较大。岩锚梁温度应力场经历了压应力增长、压应力减小、产生拉应力、拉应力快速增长并达到最大值、拉应力再减小并进入随气温周期性变化的演化趋势,各计算方案的演化趋势

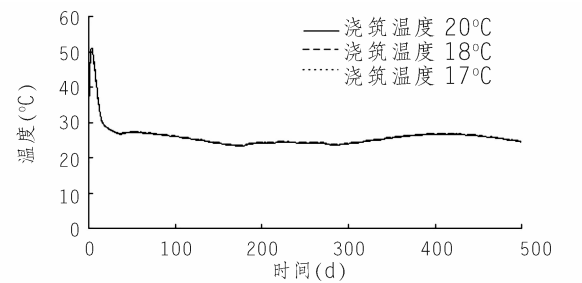


图10 典型代表点温度历时曲线

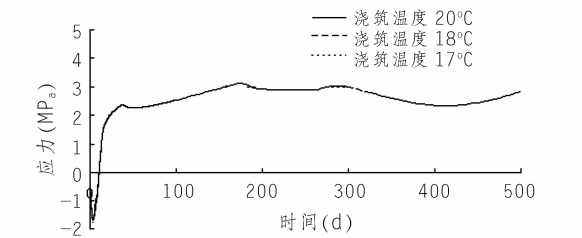


图11 典型代表点温度应力历时曲线

基本一致。随着浇筑温度的减小,最大拉应力随之减小,最小安全系数随之增加。浇筑温度从20℃到17℃,最大拉应力由3.14 MPa减至2.57 MPa,减小了0.57 MPa,变化率约为0.19 MPa/℃,最小抗裂安全系数由1.25增加到1.53,使原本不满足抗裂要求变为满足抗裂要求。因此,浇筑温度的降低可明显降低混凝土施工期的温度应力和提高最小防裂安全系数。

表2 典型代表点最小抗裂安全系数			
方案	方案1	方案2	方案3
最小安全系数	1.25	1.42	1.53

6.2 冬季保温对岩壁梁混凝土温控防裂影响分析

计算中采取的浇筑方案条件为:高温季节开浇,浇筑7 d后拆模,表面洒水养护28 d,浇筑温度17℃,通水冷却15 d。计算方案为考虑冬季保温和不考虑冬季保温两个方案。

从不同方案下典型代表点温度历时曲线(图12)温度应力历时曲线(图13)最小抗裂安全系数(表3)可以看出不同方案下岩锚梁混凝土的温度

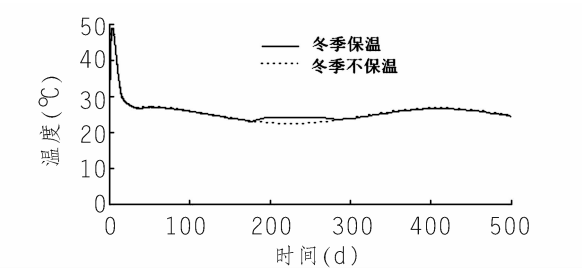


图12 典型代表点温度历时曲线

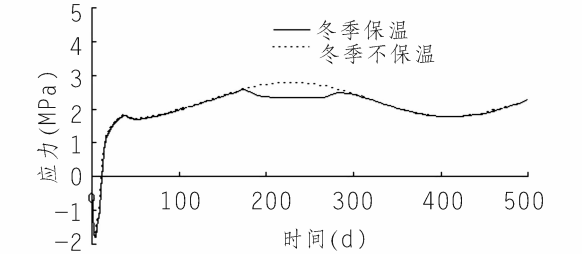


图13 典型代表点温度应力历时曲线

场均经历了水化热温升、温降和随环境气温周期变化三个阶段,各计算方案演化趋势基本一致。因冬季保温对后期冬季的温度场有一定影响,对早期的温度场没有影响,因此两种方案各特征点的最高温度不变。岩锚梁温度应力场经历了压应力增长、压应力减小、产生拉应力、拉应力快速增长并达到最大值、拉应力再减小并进入随气温周

期性变化的演化趋势,各计算方案的演化趋势基本一致。由保温转换为不保温,最大拉应力由 2.57 MPa 增至 2.77 MPa,增加了 0.2 MPa,最小安全系数由 1.53 减至 1.45,安全系数小于 1.5。因此,在岩锚梁混凝土施工养护过程中,在冬季应适当的进行冬季保温。

6.3 通水时间对岩壁梁混凝土温控防裂影响分析

计算中采取的浇筑方案条件为:高温季节开

表 3 典型代表点最小抗裂安全系数		
方案	冬季保温	不保温
最小抗裂安全系数	1.53	1.45

浇,浇筑 7 d 后拆模,表面洒水养护 28 天,浇筑温度 17 ℃,冬季保温 90 d。计算方案见表 4。

表 4 通水时间影响计算方案		
方案	通水时间 /d	通水水温 /℃
方案一	7	4 d:15 ℃,3 d:22 ℃
方案二	15	4 d:15 ℃,11 d:22 ℃
方案三	30	4 d:15 ℃,26 d:22 ℃

从不同通水时间情况下典型代表点温度历时曲线(图 14)温度应力历时曲线(图 15)和最小抗裂安全系数(表 5)可以看出不同方案下岩锚梁混

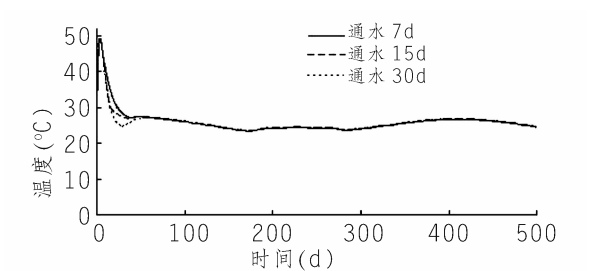


图 14 典型代表点温度历时曲线

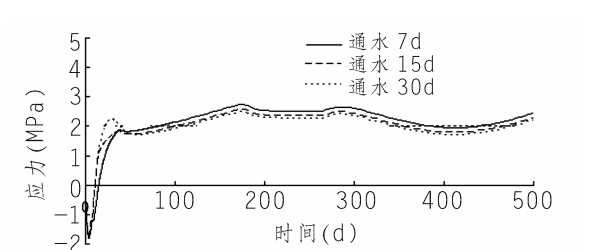


图 15 典型代表点温度应力历时曲线

表 5 典型代表点最小抗裂安全系数			
方案	方案 1	方案 2	方案 3
最小安全系数	1.43	1.53	1.33

凝土的温度场均经历了水化热温升、温降和随环境气温周期变化三个阶段,各计算方案演化趋势基本一致。通水时间对降低最高温度无作用,但

在 50 d 内对温度下降速度有一定的影响。岩锚梁温度应力场经历了压应力增长、压应力减小、产生拉应力、拉应力快速增长并达到最大值、拉应力再减小并进入随气温周期性变化的演化趋势,各计算方案的演化趋势基本一致。随着通水时间的增长,最大拉应力随之减小。在一定的时间内,随着通水时间的增加,最小安全系数会增加,但超过一定的时间,由于早期温度的下降速度太快,导致拉应力的增长过快,使早期的拉应力较大,降低安全系数,使整个方案的最小安全系数反而下降。综上分析表明:水管通水冷却是降低岩锚梁混凝土施工期最高温度、减小最大拉应力和提高抗裂安全系数的有效措施。但是通水时间如果太短会使温度降不下来,后期的拉应力较大,通水时间如果太长,则会使早期温度下降太快,使早期拉应力较大,容易导致早期产生裂缝,因此,选取合适的通水时间非常重要。

7 结 语

本文对白鹤滩水电站地下厂房岩锚梁混凝土进行了温控计算分析,可以得出以下几点结论。

(1)在高温季节浇筑的基本方案情况下,岩锚梁混凝土最高温度超过 50 ℃,最大主拉应力超过 5 MPa,最小安全系数低于 1.5,混凝土极易产生裂缝,较难满足温控防裂标准,在采取通水冷却温控方案情况下,岩锚梁混凝土最高温度控制在 49 ℃左右,最大主拉应力在 2.6 MPa 左右,最小安全系数大于 1.5,满足温控防裂要求,可作为推荐温控方案。

(2)在低温季节浇筑的基本方案情况下,岩锚梁混凝土最高温度超过 47 ℃,且最大主拉应力超过 2.6 MPa,最小安全系数低于 1.5,混凝土极易产生裂缝,较难满足温控防裂标准,在采取通水冷却温控方案情况下,岩锚梁混凝土最高温度控制在 46℃,且最大主拉应力在 2.5 MPa 左右,最小安全系数大于 1.5,满足温控防裂要求,可作为推荐温控方案。

(3)通过对岩锚梁温控防裂影响因素敏感性分析可知:浇筑温度越高,混凝土内部最高温度越高,混凝土内部最大主拉应力越大,最小抗裂安全系数越小,即浇筑温度越高,对混凝土防裂不利。冬季保温会使最大拉应力降低,最小安全系数增

(下转第 132 页)

工期要求,可综合采用多种便于操作、安全快速的安装措施,以加快施工进度。(3)大跨度桥梁安装相对技术复杂、标准严格,应选择专业队伍进行规范化、精细化作业,确保一次安装到位。(4)桥梁安装现场安全危险源相对较多、风险较大,施工前应制订详细的安全专项措施,对危险源进行全面辨识、管控。现场配置有经验、责任心强的技术和安全人员进行全过程、全方位指导和管控,确保施工安全。(5)针对应急抢险项目的现场施工组织,可充分利用、整合现场资源优势,如两岸桥台土建项目可安排提前实施,避免占用直线工期。所用材料、设备尽量选用正规厂家生产制作的成品件,在保证质量的基础上加快现场施工进度,争取尽早投入使用。(6)在桥梁安装过程中,按照设计及规范要求^[7]加强监测,缆风绳、斜拉扣绳等应及时安装到位,确保结构整体稳定。另外桥梁安装所用钢丝绳较多,必须按照规范要求^[8]及时进行检查、保养、更换。

叶巴滩水电站“11·03”临时桥的成功实施,在大江大河防洪度汛,以及在应急恢复交通等方面具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64—2015[S].中华人民共和国交通运输部发布,2015—12—01 实施.

(上接第 119 页)

加。随着通水时间的增长,最大拉应力随之减小,在一定的时间内,随着通水时间的增加,最小安全系数会增加,但超过一定的时间会导致拉应力的增长过快,降低安全系数,使的最小安全系数反而下降。

参考文献:

[1] 叶更强,方丹,江亚丽,黄可,钱军,白鹤滩水电站地下厂房位置及轴线选择设计[J].浙江水利科技,2015,43(6):46—51.

[2] 朱伯芳.大体积混凝土温度应力与温度控制[M].北京:中国电力出版社,1998.

[3] 康迎宾,贾小刚,王亚春,鲁其灿.大体积混凝土温度应力场的仿真分析[J].中国农村水利水电.2009,(3):83—86.

共和国交通运输部发布,2015—12—01 实施.

[2] 《公路工程施工安全技术规范》JTG F90—2015[S].中华人民共和国交通运输部发布,2015—05—01 实施.

[3] 《起重机械安全规程》GB6067.1—2010[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会发布,2011—06—01 实施;《起重吊装常用数据手册》,2002 年 2 月,人民交通出版社.

[4] 《钢结构设计标准》GB50017—2017[S].中华人民共和国住房和城乡建设部、中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局发布,2018—07—01 实施.

[5] 《重要用途钢丝绳》GB8918—2006[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会发布,2006—09—01 实施.

[6] 《公路工程施工安全技术规范》(JTG F90—2015)[S].中华人民共和国交通运输部发布,2015—05—01 实施;《危险性较大的分部分项工程安全管理规定》,中华人民共和国住房和城乡建设部令第 37 号,2018—06—01 施行.

[7] 《公路钢结构桥梁设计规范》JTG D64—2015[S].中华人民共和国交通运输部发布,2015—12—01 实施;《公路桥涵施工技术规范》JTG/T F50—2011[S].中华人民共和国交通运输部发布,2011—08—01 实施.

[8] 《起重钢丝绳保养、维护、检验和报废》GB/T 5972—2016[S].中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会发布,2016—06—01 实施.

作者简介:

马军林(1978-),男,汉族,甘肃通渭人,高级工程师,国家注册监理工程师,现就职于中国电建集团贵阳勘测设计研究院有限公司,从事水电水利工程施工及监理工作.

(责任编辑:卓政昌)

[4] 丁兵勇,杨忠良,唐瑜莲,陈守开,安晓伟.水电站厂房大体积混凝土温度应力分析与防裂措施[J].南水北调与水利科技.2015,(2):362—365.

[5] 何建平,涂传林.向家坝水电站大体积混凝土温度应力与温度控制[J].人民长江.2009,40(11):20—23.

作者简介:

赵修龙(1989-),男,江苏扬州人,工程师,硕士,主要从事水电站厂房设计工作;

万祥兵(1978-),男,江西南昌人,教授级高级工程师,本科学历,主要从事电站厂房设计工作;

方丹(1980-),男,安徽黄山人,教授级高级工程师,硕士,主要从事电站厂房设计工作;

李良权(1981-),男,湖北武汉人,高级工程师,博士,主要从事水电站厂房设计工作.

(责任编辑:卓政昌)

四川省正式同意开展乌东德水电站蓄水验收工作

在国家能源局、四川省能源局高度重视下,经三峡集团上下共同努力,乌东德水电站蓄水验收工作取得了重要进展。2019 年 10 月 16 日,四川省能源局正式印发《四川省能源局关于金沙江乌东德水电站工程蓄水验收工作有关事项的函》(川能源水电〔2019〕113 号),同意开展乌东德水电站蓄水验收工作,并委托水电总院根据相关规定组织实施。至此,作为两省界河电站,乌东德水电站蓄水验收工作已得到四川、云南两省的正式批准,为顺利实现 2020 年 7 月首批机组投产发电目标又迈出了实质性的重要一步。