

碾压混凝土坝小温差的中后期通水冷却

薛一峰¹, 王琳², 张晓飞², 何岚¹, 李萌³

(1. 陕西省水利电力勘测设计研究院 水电工程分院, 陕西 西安 710001;

2. 西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048;

3. 陕西省东庄水利枢纽工程建设有限责任公司, 陕西 礼泉 713208)

摘要: 通水冷却是减少碾压混凝土坝温度裂缝的主要措施,但通常后期冷却即在混凝土龄期 120 d 后快速降低水温,容易引起较大的自生应力和拉应力,小温差冷却可将中后期冷却开始时间提前,有效降低温度应力。但不同中后期通水冷却方式产生的温度应力相差较大,如何将小温差方式合理运用在坝体中后期冷却中需要精细分析。运用自行开发的浮动网格法三有限元温控仿真程序对碾压混凝土坝的小温差中后期冷却方式开展研究。结果表明:当采用小温差的中后期通水冷却时,坝体温度和温度应力明显降低。当混凝土龄期结束后立即开始通水冷却,并且在中后期冷却时开展多档通水冷却,缓慢降低通水温度,可有效降低坝体温度和温度应力,为实际工程提供有利参考。

关键词: 碾压混凝土坝;小温差;冷却水管

中图分类号: TV642.2

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2019)02—0140—05

Small Temperature Difference in the Middle and Late Water Cooling Stages of RCC Dam

XUE Yifeng¹, WANG Lin², ZHANG Xiaofei², HE Lan¹, LI Meng³

(1. Shaanxi Province Institute of Water Resources and Electric Power Investigation and Design,

Hydropower Engineering Branch, Xi'an, Shaanxi 710001, China;

2. College of Water Resources and Hydropower Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China;

3. Shaanxi Dongzhuang Water Conservancy Construction Co., Ltd., Liquan, Shaanxi 713208, China)

Abstract: Water cooling is the main measure to reduce temperature cracks in RCC dams. But usually later cooling means reducing water temperature rapidly after 120 days of the concrete age may cause larger self stress and tensile stress inside the concrete. The small temperature difference cooling can advance the starting time of middle and late cooling stages, and reduce the temperature stress effectively. However, the difference of temperature stress produced by different middle and late stages water cooling methods is large. It is necessary to analyze precisely how to use the small temperature difference methods in the middle and late cooling stages of dams properly. The cooling methods of RCC dam in the middle and late stages is analyzed by using the self-developed 3-D FEM floating mesh method temperature controlling simulation program. Result shows that when the small temperature difference is used to cool the dam in the middle and late stages, the temperature and temperature stress of the dam reduced obviously. When the age of the concrete is over, the dam should be cooled immediately, several levels of water temperature should be set in the middle and late cooling stages, and reducing the temperature of the water slowly, which can reduced the temperature and temperature stress of the dam effectively. Study result will provide a favorable reference for practical projects.

Keywords: RCC dam; small temperature difference; cooling water pipe

通水冷却是减少碾压混凝土坝温度裂缝的主要措施^[1-3]。但在实际工程中,通水冷却的不利因素

并未引起重视。通常后期冷却都在混凝土龄期 120 d 后开始通水,为达至目标温度,需要快速降低水

温,在水管附近容易引起较大的自生应力和拉应力^[4-5]。

刘俊等^[6]对大体积混凝土小温差의长期通水冷却进行了研究,认为小温差长期通水冷却能够降低混凝土拉应力。朱伯芳等^[7-12]提出小温差早冷却의通水冷却方式,认为将中后期冷却和初期冷却连接起来,能够避免较大拉应力的产生。但是对中后期冷却如何规划,如何将小温差早冷却方式合理运用在坝体中后期冷却中需要精细分析。

Chen 等^[13]自 1989 年起开展薄层浇筑混凝土的温度应力有限元仿真分析,提出了三维有限元浮动网格法,将网格浮动成多个大网格,已在龙滩碾压混凝土重力坝的温度应力仿真计算进行了实际应用,此方法不但降低了工作量又保证了计算精度。

本文基于碾压混凝土坝温度计算原理,采用浮动网格法,对碾压混凝土坝的中后期冷却方式进行精细规划,对中后期冷却采用多档通水,分散温差,并针对碾压混凝土重力坝工程进行验证,为实际过程提供科学依据。

1 碾压混凝土坝温度场计算原理及仿真程序编制

1.1 水管冷却的基本方程

温度场分析的基本方程,即热传导方程为^[14]:

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

式中: a 为混凝土的导温系数, m^2/h ; λ 为混凝土的导热系数, $\text{kJ}/(\text{m} \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{C})$; ρ 为混凝土的密度, kg/m^3 ; c 为混凝土的比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; τ 为时间, h ; θ 为混凝土的绝热温升, $^\circ\text{C}$ 。

本文采用隐式解法假定复杂应力状态下的应变增量呈线性变化。假定后的应力历时曲线为折线式,与实际应力历时曲线接近,如图 1 所示。

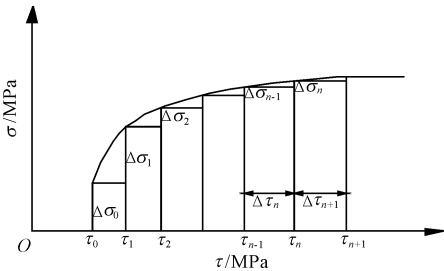


图 1 应力随时间增量图

在时段 V_{τ_n} 内,总应变增量通过下式计算:

$$\{V\epsilon_n\} = \{V\epsilon_n^e\} + \{V\epsilon_n^c\} + \{V\epsilon_n^T\} + \{V\epsilon_n^0\} \quad (2)$$

式中: $\{V\epsilon_n\}$ 为总应变的增量列阵; $\{V\epsilon_n^e\}$ 为弹性应

变的增量列阵; $\{V\epsilon_n^c\}$ 为徐变应变的增量列阵; $\{V\epsilon_n^0\}$ 为自生体积应变的增量列阵; $\{V\epsilon_n^T\}$ 为温度应变的增量列阵。

1.2 三维有限元浮动网格法

将龄期达到某一相同时间的若干个小网格单元合并为一层大网格单元,合并后,单元体可作为均质体计算。碾压混凝土的层厚一般为 0.5 m,铅直方向的温度和应力变化较大,计算时需要采用密集的网格。并且每浇筑一次,需要计算一次的温度场和应力场。当施工过程中,最上层的龄期达到 28 d 后,其温升、弹性模型、徐变随时间变化较小,可将其合并为一层大单元体,上层新浇筑的薄层单元仍按照小步长精确计算^[14]。因此,薄层连续浇筑也在此方法中进行了考虑,碾压混凝土浇筑层数较多,但每个单元都进行了精确计算。

1.3 仿真程序的总体结构

前处理、计算程序、后处理系统构成了完整的仿真程序。前处理系统采用 Visual Basic 语言编写,程序主题采用的浮动网格法^[7]在 Visual Fortran 中编写。后处理系统可处理温度场和应力场的温度及应力变化结果。

程序的总体结构见图 2。

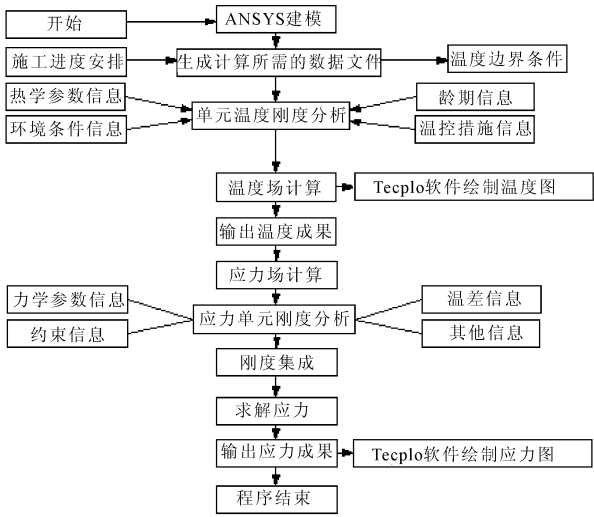


图 2 程序的总体结构

2 中后期通水冷却研究

朱伯芳认为混凝土通水冷却时,需要分散温差,将最高温度和最低温度分割降低为 3~5 个温差。但是传统在二期通水冷却时,温度虽然也有降低,但是极易造成应力不满足规范要求。在中后期冷却中,可将其通水温度逐步降低,将中后期冷却分割成多期冷却,以便其应力满足要求,提高其抗裂安全度。

下文将着重研究如何开展中后期多档通水冷却。

2.1 数值算例

选择某碾压混凝土重力坝非溢流坝段为计算模型,其坝高为 98 m,坝顶长度 294 m,坝体上下游及底部均延伸 1 倍坝高并作为地基,取值为 100 m,常态混凝土垫层厚度为 1.5 m,碾压浇筑层为 3 m,每连续碾压浇筑 3 m 后,间歇期选择为 10 d,浇筑时间为 395 d,有限元模型共有节点 73 250 个。整体计算模型见图 3。

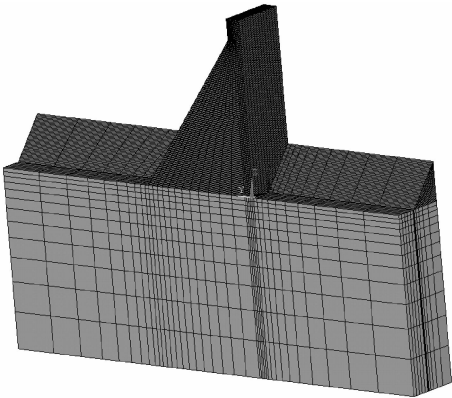


图 3 整体计算模型图

不同方案的前期冷却措施均相同,冷却水管间距为 1.5 m×1.5 m,通水流量为 1.0 m³/h,冷却水管

长度为 250 m。在大层浇筑完后立即进行初期通水冷却,通水时间 10 d,通水温度 25℃。在中后期通水冷却中采用以下三种方案进行研究:

方案 1:将冷却通水降温分为一档,浇筑完 90 d 后立即开始后期通水冷却,通水时间为 60 d,通水温度控制在 9℃。正常通水冷却。

方案 2:将冷却通水降温分为两档,浇筑完 60 d 后开始通水冷却。第一档通水时长为 30 d,通水温度控制在 19℃;第二档通水时长为 40 d,通水温度控制在 9℃。第二档通水冷却紧接第一档通水。

方案 3:将冷却通水降温分为四档,浇筑完 30 d 后(龄期结束)开始通水冷却。第一档通水时长为 30 d,通水温度控制在 24℃;第二档通水时长为 30 d,通水温度控制在 19℃;第三档通水时长为 30 d,通水温度控制在 14℃;第四档通水时长为 30 d,通水温度控制在 9℃。混凝土热力学指标见表 1。

2.2 温度场仿真计算结果及分析

温度场仿真计算结果结果见图 4—图 9。典型温度云图为施工期末和运行期的温度变化,可以看到施工期末温度最高,运行期温度逐渐降低。施工期属于不稳定温度场,环境温度、混凝土水化热是影响坝体温度最主要的因素。在运行期,环境温度是影响温度变化的主要因素。

表 1 混凝土热力学指标汇总表

混凝土种类	密度 /(10³kg·m ⁻³)	弹性模量 /(10³ MPa)	线胀系数 /(10 ⁻⁶ /℃)	导热系数 /(kJ·m ⁻¹ ·h ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	比热 /(kJ·kg ⁻¹ · ℃ ⁻¹)	绝热温升式 /℃	导温系数 /(m²·h ⁻¹)
C20	2.40	$E = 31.34(1 - 0.567e^{-0.032t})$	0.85	9.905	0.9920	$T_r = \frac{23.695t}{t + 3.92}$	0.0042
C15	2.40	$E = 28t^{0.9783} / (13.12 + t^{0.9783})$	0.85	10.660	0.9773	$T = \frac{19.085(t^{1.151} - 1.388)}{3.957 + t^{1.151}}$	0.0043

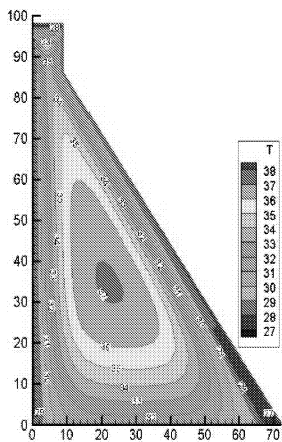


图 4 方案 1:施工期末
2014-11-15 温度
云图(单位:℃)

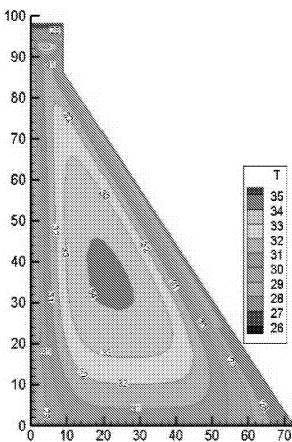


图 5 方案 2:施工期末
2014-11-15 温度
云图(单位:℃)

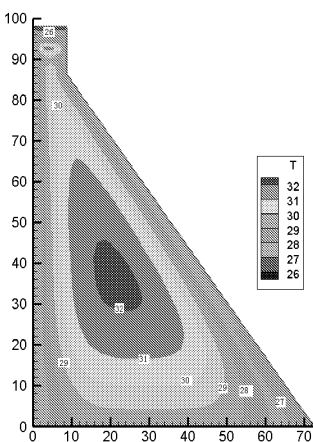


图 6 方案 3:施工期末
2014-11-15 温度
云图(单位:℃)

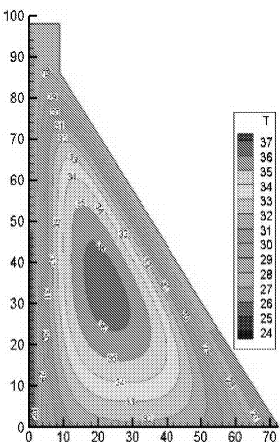


图 7 方案 1:运行期
2015-5-15 温度
云图(单位:℃)

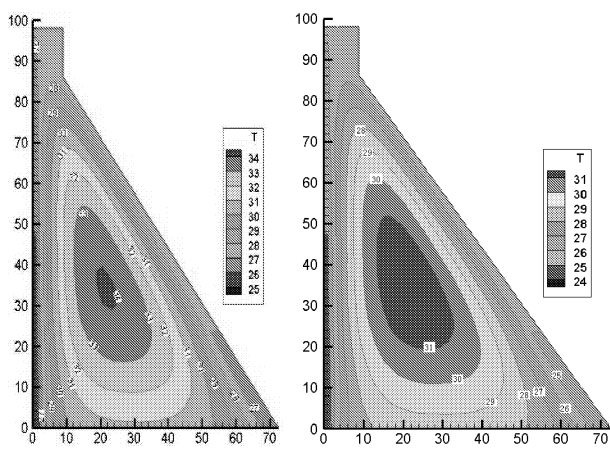


图 8 方案 2:运行期
2015-5-15 温度
云图(单位:℃)

图 9 方案 3:运行期
2015-5-15 温度
云图(单位:℃)

根据规范设计基础强约束区(0 m ~ 14.5 m)的允许最高温度为 38.5℃ ~ 40.5℃,方案 1 采用传统二期通水冷却,最高温度为 37.03℃,方案 2 和方案

3 均采用中后期通水冷却,最高温度分别为 35.49℃ 和 29.8℃。采用中后期通水冷却时,其水管附近温度梯度低于传统的二期通水冷却。

根据规范设计基础弱约束区(14.5 m ~ 29.0 m)的允许最高温度为 40.0℃ ~ 42.5℃左右,方案 1 采用传统二期通水冷却,最高温度为 37.01℃,方案 2 和方案 3 均采用中后期通水冷却,最高温度分别为 34.49℃和 31.8℃,均满足要求。

在中后期通水冷却中,采用了小温差的冷却方式,能够明显降低坝体温度,并且水管附近温度梯度明显降低。而将中后期通水冷却方案分割越多,其温度越低,体现了小温差冷却的优势。

2.3 应力场仿真计算成果及分析

限于典型点较多,本文只取 415.50 m 和 469.50 m 中间高程的典型点的主应力历时曲线,并分别取其施工期和运行期的最大温度应力值,见表 2 和表 3。

表 2 各方案不同部位施工期的温度应力最大值表

单位:MPa

区域方案	x 向应力			z 向应力		
	强约束区 (0 ~ 14.5 m)	弱约束区 (14.5 ~ 29.0 m)	非约束区 (29.0 ~ 98.0 m)	强约束区 (0 ~ 14.5 m)	弱约束区 (14.5 ~ 29.0 m)	非约束区 (29.0 ~ 98.0 m)
方案 1	0.56	0.44	0.40	0.56	0.40	0.40
方案 2	0.42	0.35	0.35	0.36	0.30	0.30
方案 3	0.37	0.32	0.32	0.33	0.30	0.30

注:应力以受拉为正,受压为负。

表 3 各方案不同部位运行期的温度应力最大值表

单位:MPa

区域方案	x 向应力			z 向应力		
	强约束区 (0 ~ 14.5 m)	弱约束区 (14.5 ~ 29.0 m)	非约束区 (29.0 ~ 98.0 m)	强约束区 (0 ~ 14.5 m)	弱约束区 (14.5 ~ 29.0 m)	非约束区 (29.0 ~ 98.0 m)
方案 1	0.54	0.54	0.54	1.34	1.34	1.34
方案 2	0.46	0.46	0.46	0.98	0.98	0.98
方案 3	0.40	0.40	0.40	0.98	0.98	0.98

采用小温差冷却措施后,坝体不同约束区不同方向的温度应力均有所降低,各方案施工期不同区域最大温度应力值见表 2,运行期最大温度应力值见表 3。

可以看到,在后期通水冷却中采用了小温差的冷却方式后,温度应力明显降低,并且方案 3 的温度应力低于方案 2 的温度应力。当坝体浇筑完强约束区域,坝体第一主应力和第三主应力均在采用通水冷却措施后有所降低。方案 1 的最大温度应力为 0.56 MPa,方案 2 和方案 3 的最大温度应力分别为 0.42 MPa 和 0.37 MPa,温度应力降低明显。方案 3

将中后期冷却的小温差分档后,发现温度应力明显低于方案 2 的温度应力。方案 2 和方案 3 在 60 d、30 d 时即开展通水冷却,将通水时间提前,温度应力均明显低于方案 1。

可以看出在中后期通水冷却时,若在混凝土龄期结束后立即开始通水冷却,可降低温度应力。在冷却时,将冷却水温分为多档,缓慢冷却,也可降低温度应力。规范规定混凝土和冷却水温温差不超过 20℃^[15],本文将冷却水温度提高,使混凝土和冷却水温温差缩小,验证了朱伯芳提出的温差不宜超过 8℃ ~ 10℃的理论^[9]。

采用小温差冷却原则,能够延长混凝土冷却时间,降低混凝土上下层温差及混凝土内部温差,控制坝体内部温度应力,有利的降低混凝土裂缝的产生。

3 结 论

(1) 正常通水冷却相比小温差通水冷却方案,会导致水管附近温度梯度过大,导致出现过大的拉应力,导致混凝土产生裂缝。

(2) 在中后期通水冷却中,在混凝土龄期结束后立即开始通水冷却,并且采用多档通水冷却措施能够延长冷却时间,有利于降低温度应力。由于中后期冷却是将冷却开始时间提前,并不会拖延施工进度,在施工中多改变几次水温对减小温度应力、防止裂缝的效果十分显著。

参考文献:

- [1] 亢景付,赵蒙蒙,蒋元成,等.约束程度与温度应力之间的关系研究[J].水利与建筑工程学报,2014,12(6):21-25.
- [2] 段寅,胡中平,罗立哲,等.大型地下洞室衬砌混凝土温控防裂研究[J].水利与建筑工程学报,2015,13(4):107-110.
- [3] 相昆山,张宏战,马震岳,等.寒冷地区碾压混凝土重力坝温控防裂研究[J].水利与建筑工程学报,2013,11(5):200-203.
- [4] 朱伯芳,王同生,丁宝瑛,等.水工混凝土结构的温度应力与温度控制[M].北京:水利电力出版社,1976.
- [5] 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,1999.
- [6] 刘俊,黄玮,周伟,等.大体积混凝土小温差的长期通水冷却[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(5):549-553.
- [7] 朱伯芳,张超然.高拱坝结构安全关键技术研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [8] 朱伯芳.论混凝土坝的水管冷却[J].水利学报,2010,39(5):505-513.
- [9] 朱伯芳,吴龙,杨萍,等.混凝土坝后期水管冷却的规划[J].水利水电技术,2008,39(7):27-31.
- [10] 朱伯芳,李玥,吴龙,等.关于混凝土坝基础混凝土允许温差的两个原理[J].水利水电技术,2008,39(7):21-26.
- [11] 朱伯芳,吴龙坤,杨萍,等.利用塑料水管易于加密以强化混凝土冷却[J].水利水电技术,2008,39(5):36-39.
- [12] 朱伯芳,吴龙坤,张国新.混凝土坝水管冷却的利与弊[J].水利水电技术,2009,40(12):26-30.
- [13] Chen Yaolong, Wang Changjiang, Li Shouyi, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3-D finite element relocating mesh method[J]. Advances in Engineering Software, 2001,32(9):677-682.
- [14] 李守义,张金凯,张晓飞.碾压混凝土坝温度应力仿真计算研究[M].北京:中国水利水电出版社,2010.
- [15] 国家能源局.混凝土坝温度控制设计规范:NB/T 35092—2017[S].北京:电力出版社,2017.
- [5] 中国水电工程顾问集团公司、水电水利规划设计总院等.土石坝技术 2012 年论文集[M].北京:中国电力出版社,2012:307-318.
- [6] 中华人民共和国水利部.水利水电工程等级划分及洪水标准:SL 252—2017[S].北京:中国水利水电出版社,2017.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.水工建筑物抗震设计标准:GB 51274—2018[S].北京:中国计划出版社,2018.
- [8] 中华人民共和国水利部.碾压土石坝设计规范:SL 274—2001[S].北京:中国水利水电出版社,2002.
- [9] 水利部水利水电规划设计总院.水工设计手册:第 6 卷土石坝[M].北京:中国水利水电出版社,2014.
- [10] 张洪海,袁友仁.高心墙堆石坝结构设计中几个问题探讨[J].水电能源科学,2011,29(9):54+78-80.
- [11] 刘玉玺,张忠辉,李吴昊潼.喀麦隆曼维莱水电站土石坝心墙反滤设计[J].水利水电工程设计,2017,36(3):48-51.
- [12] 郭江涛,张少宏,康顺祥.亭口水库大坝反滤料选料研究[J].水资源与水工程学报,2015,26(4):214-218.
- [13] 王俊奇,李闯,董晔.Bishop 法的半解析解及其广义数学模型[J].水利与建筑工程学报,2015,13(12):127-132.
- [14] 费野占,否平.基于强度折减理论的水位下降坝坡稳定性分析[J].水利与建筑工程学报,2017,15(1):218-222.
- [15] 齐小静,石自堂,等.基于强度折减法的土石坝稳定性分析及失稳判据选择研究[J].水利与建筑工程学报,2016,14(2):107-111.

(上接第 134 页)