

寒冷地区某碾压混凝土重力坝温控计算分析*

李永刚, 李守义

(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

[摘要] 结合寒冷地区某碾压混凝土坝工程的实际情况, 采用三维有限元浮动网格法对该坝施工期和运行期温度场、温度徐变应力场进行了仿真计算。计算完全按照实际施工过程进行模拟, 全面考虑了坝体薄层浇筑过程和浇筑温度及各种外荷载。对比分析了寒潮对坝体应力的影响, 为碾压混凝土重力坝的设计和施工中的温控提供了参考依据。

[关键词] 碾压混凝土重力坝; 温度应力; 浮动网格法; 仿真分析; 寒潮

[中图分类号] TV 431

[文献标识码] A

[文章编号] 1671-9387(2005)08-0153-04

碾压混凝土重力坝(RCC)作为一种新材料坝, 近年来得到越来越广泛的重视和应用。国内目前已有数十座RCC坝在建或拟建^[1], 呈现出良好的发展态势。为了掌握RCC坝温度场和应力场的发展过程和分布规律, 首先必须对坝体进行温度场仿真计算分析。RCC坝采用薄层碾压、连续上升的施工方式, 要做到精细仿真, 必须逐层剖分单元。进行整体三维计算时, 节点数以数万至数十万计, 加之计算达数百步, 使计算量过大或效率低下。针对这些问题, 引进浮动网格法^[2,3], 可使单元和节点数大为减少, 同时

不影响温度场和应力场解的精度。该碾压混凝土重力坝所在地区冬季气温较低, 寒冷气流频繁, 大坝的温度控制措施是保证大坝质量的关键技术之一。本研究采用三维有限元浮动网格法对大坝进行温度场和应力场分析, 并对比分析了寒流对坝体的影响, 为碾压混凝土重力坝温控设计提供了重要依据。

1 基本资料

1.1 混凝土与基岩热力学、力学参数

混凝土的试验数据及基岩热力学参数见表 1。

表 1 混凝土与基岩热力学参数

Table 1 Thermodynamic parameters of the material

试样 Material	导热系数/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) Thermal coefficient of conduction	导温系数/ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$) Thermal diffusivity	最终绝热温升/ Final temperature rise	比热/ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) Specific heat	线胀系数/ ($10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) Linear expansion coefficient	放热系数/ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) Surface coefficient of heat evolution	容重/ Bulk density ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
C ₉₀ 20D100	9.82	0.0046	30.18	0.9034	7	67	24.2
C ₁₈₀ 20D300	10.105	0.005	22.47	0.86036	5.8	67	24.37
C ₁₈₀ 15D50	10.223	0.005	15.96	0.87145	6.7	67	23.89
C ₂₈ 40D300	9.523	0.0044	45.42	0.92582	7	67	24.3
地基 Foundation	6.87	0.00319			7	67	26.66

混凝土的弹性模量 E (MPa) 拟合公式为

$$C_{90}20D100: E = 34\,500 * \tau / (10.2 + \tau);$$

$$C_{180}20D300: E = 30\,500 * \tau / (5.08 + \tau);$$

$$C_{180}15D50: E = 30\,300 * \tau / (4.08 + \tau);$$

$$C_{28}40D300: E = 36\,500 * \tau / (11.2 + \tau).$$

式中, τ 为龄期(d)。

基岩弹性模量: $E_0 = 20\,300 \text{ MPa}$ 。

1.2 混凝土徐变度

混凝土徐变度 C (Pa) 拟合公式为

$$C(t, \tau) = (A_1 + B_1 \tau^{C_1}) [1 - e^{-D_1(t-\tau)}] + (A_2 + B_2 \tau^{C_2}) [1 - e^{-D_2(t-\tau)}],$$

式中, $A_1, B_1, C_1, D_1, A_2, B_2, C_2, D_2$ 分别为材料特性参数, 其取值见表 2。

* [收稿日期] 2004-12-06

[作者简介] 李永刚(1980-), 男, 河北邯郸人, 硕士, 主要从事水土结构应力仿真研究。



表 2 徐变度参数取值表
Table 2 Creep parameters of dam material

材料 Material	A ₁	B ₁	C ₁	D ₁	A ₂	B ₂	C ₂	D ₂
C ₁₈₀ 15D50	4.56	100	0.313	0.5	0	100	0.325	0.1
C ₁₈₀ 20D300	0.056	100	0.5	0.5	0	99.836	0.45	0.075
C ₉₀ 20D100	5.943	54.597	0.45	0.3	13.417	22.809	0.45	0.005
C ₂₈ 40D300								

2 计算方法及计算模型

2.1 计算方法

该坝坝高 120 m, 浇筑层厚 0.3 m, 总浇筑层达 400 多层。为保证施工期的仿真计算精度, 计算单元划分和计算步长均比较小, 单元厚度为浇筑层厚度, 计算步长为薄层浇筑时间 0.25 d。但这样划分单元节点多, 加上计算次数多, 计算量非常大。为了节省内存, 缩短计算时间, 计算中采用浮动网格法^[3]。即当薄层浇筑的混凝土达到一定龄期后, 各薄层混凝土的物理力学性质, 如弹性模量、水化热温升、徐变度等随龄期的变化已很小, 可将按薄层划分的小单元合并为大单元。这样, 随着坝体的升高, 坝体计算单元都经过由小单元计算到大单元计算的浮动过程, 实现了对坝体施工过程薄层浇筑的完全模拟, 且计算量较小, 可在微机上实现仿真计算。

2.2 计算模型

该计算模型取一个坝段。由于温度应力是一个自平衡力系, 其影响主要发生在温度变化激烈部位的周围, 而坝体温度对地基的影响深度一般不超过 30 m, 同时考虑到在计算规模和时间上的限制, 在坝踵上游和坝趾下游及地基深度一般取 1 倍坝高。

整体坐标系的坐标原点在坝段正中间坝踵处。坝轴线指向右岸为 x 轴正向, 下游方向为 y 轴正向, 铅直向上为 z 轴正向。计算模型如图 1 所示。

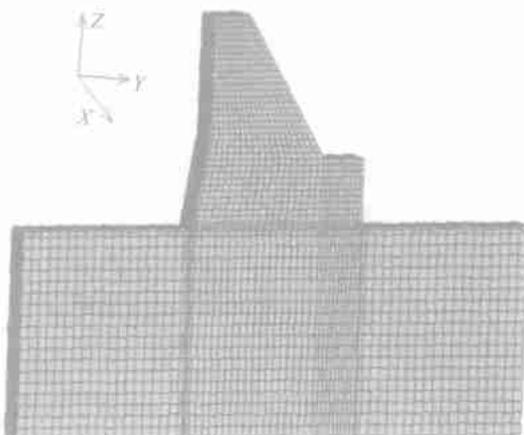


图 1 碾压混凝土重力坝温控计算模型

Fig. 1 Temperature control simulation modal of RCC gravity dam

温度场计算中边界条件的选取: 地基地面和 4 个侧面以及坝段横缝为绝热边界^[4]。坝体上下游面在水位以上为固—气边界, 水位以下为固—水边界。固—气边界按第 3 类边界条件处理, 固—水边界按第 1 类边界条件处理^[4,5]。

应力场计算中按对称结构取整个坝段的 1/2 进行计算。选取边界条件时, 地基地面按固定支座处理, 地基在上下游方向按 y 向简支处理, 坝体及地基在对称面上按 x 向简支处理, 其余为自由边界。

3 温控方案

计算坝段长度为 25 m, 冬季停工, 混凝土浇筑温度为月平均气温(表 3)。

表 3 混凝土浇筑温度

Table 3 Pouring temperature of the concrete

月份 Month	浇筑温度 Temperature	月份 Month	浇筑温度 Temperature
1		7	21.9
2		8	19.9
3		9	13.6
4	7.2	10	5.0
5	14.8	11	
6	20.1	12	

施工期低温季节(10 月~翌年 4 月)采取表面保温措施, 保温材料为 5 cm 厚的苯板^[6], 保温后的等效热交换系数 $\beta = 2.4 \text{ kJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{h} \cdot \text{°C})$ 。运行期第 1 个冬季表面保温, 到第 2 年 4 月底拆除保温层。

4 温度场计算结果分析

分析施工期、运行期温度场计算结果可以看出:

(1) 坝体上游防渗体和下游耐磨层区域温度高, 坝体内部温度相对较低。主要原因是坝体上游防渗体和下游耐磨层区域混凝土标号高, 绝热温升大; 坝体内部混凝土标号低, 绝热温升小。

(2) 坝体中心温度场沿坝高出现 2 个高温区和 2 个低温区, 施工期末坝体温度分布见图 2。高温区均在 6~8 月份施工的部位, 低温区出现在冬季停工季节以及 4 和 10 月份浇筑的部位。这是因为高温季节混凝土入仓温度高(19.9~20.1), 外界气温高(19.9~20.1)且散热条件差, 导致坝体中心温度

值大; 低温季节混凝土入仓温度低(5~7.2℃), 外界气温低(5~7.2℃)且散热条件好, 坝体中心温度值小。冬季停工季节, 外界气温很低, 最低达-20.7℃, 坝块顶面温度较其他部位低, 但由于采取表面保温措施, 此处温度不低於-2℃。

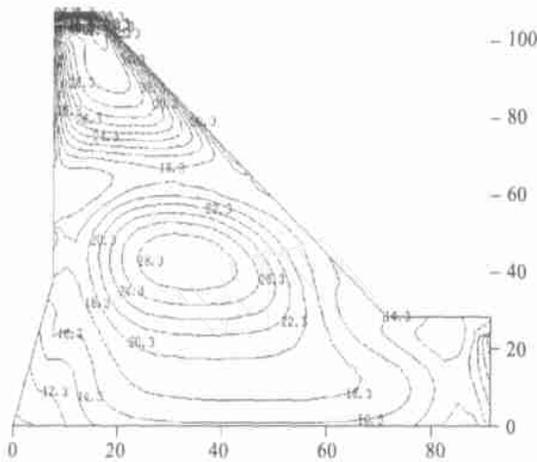


图 2 施工期末(第 3 年 9 月)温度等值线图
Fig. 2 Temperature contour of September

(3) 坝体由表及里温度逐渐增大, 靠近表面的温度梯度大, 坝体内部温度梯度小, 其原因是环境温度与库水温度对坝体表层混凝土的温度影响较大, 而对内部混凝土的温度影响较小。坝体内部最高温度值仅与混凝土浇筑温度和龄期有关, 随着时间的推移, 坝体内部同一部位的温度逐渐降低, 但降温速度比较缓慢。

(4) 坝体下游耐磨层区域温度高, 最高温度值为 47.16℃, 位置在坝高 103.5m 处下游耐磨层内, 时间为该部位混凝土浇筑后第 4 天。

(5) 坝体内部最高温度到稳定温度需要漫长的过程, 计算结果表明, 坝体施工完运行 30 年后坝体温度趋于准稳定温度场。

(6) 寒潮对坝体混凝土的影响深度不大, 对坝体中心温度影响很小, 中心温度降低约 0.16℃。表面保温措施可显著减少寒潮对表面温度的影响。

5 应力场计算结果分析

从温度应力计算结果及温度应力分布图(σ_{ymax} 沿坝高分布见图 3, σ_{xmax} , σ_{zmax} 沿坝高分布与 σ_{ymax} 基本相同, 限于篇幅故略)可以看出:

(1) 坝体基础垫层、坝体下游面耐磨层内以及坝体挑坎拐点处的温度应力、综合应力均较大, 除坝体基础垫层和坝体下游面耐磨层内局部部位以及坝体挑坎拐点处的温度应力超过 2.0MPa 外, 坝体其

他部位的温度应力均未超过 2.0MPa。

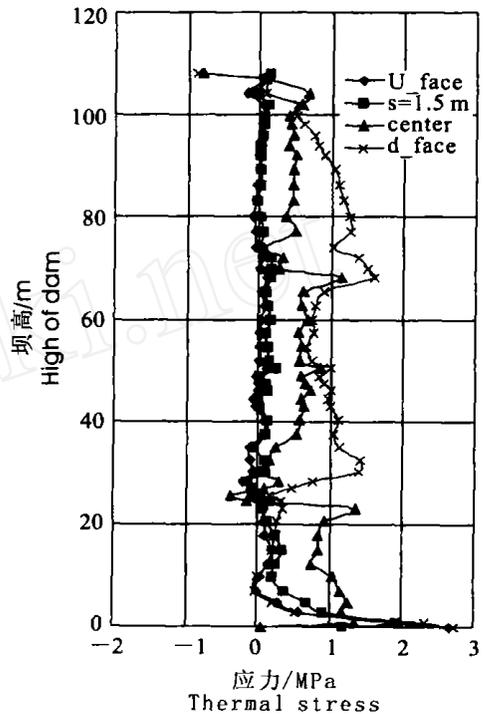


图 3 典型点测试应力 σ_{ymax} 沿坝高分布图

Fig. 3 Stress (σ_{ymax}) of typical vertical tested points

(2) 坝体基础垫层混凝土的应力较大, 仅考虑温度作用时, 坝踵附近应力 $\sigma_{xmax} = 1.75 \text{ MPa}$, $\sigma_{ymax} = 2.30 \text{ MPa}$, $\sigma_{zmax} = 2.19 \text{ MPa}$; 坝趾附近 $\sigma_{xmax} = 2.11 \text{ MPa}$, $\sigma_{ymax} = 2.44 \text{ MPa}$, $\sigma_{zmax} = 2.35 \text{ MPa}$ 。考虑温度、自重和水压力共同作用时, 坝踵附近应力 $\sigma_{xmax} = 2.09 \text{ MPa}$, $\sigma_{ymax} = 2.88 \text{ MPa}$, $\sigma_{zmax} = 2.39 \text{ MPa}$, 坝趾附近 $\sigma_{xmax} = 1.67 \text{ MPa}$, $\sigma_{ymax} = 1.19 \text{ MPa}$, $\sigma_{zmax} = 1.49 \text{ MPa}$ 。这主要是由于坝体基础垫层混凝土绝热温升较大(达 30.18℃), 加之基础的约束作用, 降温产生的拉应力值大。

(3) 坝体下游面与坝体其他部位相比, 温度应力较大, 其主要原因是下游面耐磨层混凝土标号高, 绝热温升大(达 45.42℃), 降温产生的拉应力也大; 坝体挑坎拐点处温度应力较大, 这是由于拐点处产生的应力集中。

(4) 冬季长时间停工后, 新浇混凝土由于受到旧混凝土的约束, 由此产生的温度应力也比较大, 发生部位在坝高 68~90m 内, 仅考虑温度作用时, $\sigma_{xmax} = 2.35 \text{ MPa}$, $\sigma_{ymax} = 1.46 \text{ MPa}$, $\sigma_{zmax} = 2.41 \text{ MPa}$, 均出现在下游面; 考虑温度、自重和水压力共同作用时, $\sigma_{xmax} = 2.36 \text{ MPa}$, $\sigma_{ymax} = 1.41 \text{ MPa}$, $\sigma_{zmax} = 2.21 \text{ MPa}$, 同样均出现在下游面。

(5) 坝体表面应力较大, 坝体内部应力较小; 坝

体对称面上应力较大,离对称面越远应力越小。

(6) 考虑温度、自重和水压力共同作用后,施工期综合应力较温度应力小,尤其是坝趾的 σ_{\max} 降幅最大。运行期综合应力与温度应力相比,坝趾附近应力值明显减小,而坝踵附近应力值增大。这是由于运行期水库蓄水结束后上游水位较高,上游水压力产生的拉应力较大,使得坝踵附近拉应力值增大。

(7) 与施工期相比,运行期应力增大。这是因为随着时间的增加,混凝土弹性模量不断增大,坝体温度逐渐降低,温差值增大,因而应力值也增大。

(8) 对比分析有寒潮和无寒潮两种情况下温度应力可以看出,寒潮对 α 和 σ 的影响较大,对 σ 的影响很小。由于寒潮作用使应力增大,而此时混凝土龄期较短(3~5 d),混凝土的抗拉强度较低,所以由于寒潮作用产生的拉应力有可能超过相应龄期混凝土的抗拉强度,因此应加强新浇筑混凝土的表面保护。

6 结论和建议

(1) 坝体上游防渗体和下游耐磨层区域温度

高,整个施工期及运行期坝体最高温度值为 47.16,发生在坝体下游耐磨层内。

(2) 除坝体基础垫层和下游面耐磨层内局部部位,以及坝体挑坎拐点处的温度应力超过 2.0 MPa 外,坝体其他部位的温度应力均未超过 2.0 MPa。

(3) 寒潮对 α 和 σ 的影响较大,对 σ 的影响很小,而且影响深度不大。由于寒潮作用会使混凝土表面应力增大,因此,特别要注意对新浇混凝土的表面保护,防止产生表面裂缝。

(4) 计算时设计横缝间距为 25 m,因此基础对坝体的约束大,建议减小横缝间距,以减小基础对坝体的约束。

(5) 为了将混凝土温度应力值控制在允许范围内,建议在基础强约束区和新老混凝土的结合部将混凝土的浇筑温度控制在 15 以内。在坝体的其他部位,当外界气温高于 20 时,浇筑温度控制在 20 以内。

(6) 坝体温降是一个漫长的过程,为了避免冬季由于气温过低对坝体产生冷击作用,建议在运行期初期的冬季对坝体下游面采取保温措施。

[参考文献]

- [1] 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.
- [2] 李守义, 冯海波, 陈尧隆. 浇筑温度对碾压混凝土重力坝温度应力的影响[J]. 中国农村水利水电, 2003, (8): 58-60.
- [3] Chen Y L, Wang C J, Li S Y. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3-D finite element relocating mesh method[J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(9): 671-682.
- [4] 李守义, 赵基花. 碾压混凝土重力坝温度场与温度徐变应力仿真分析[J]. 西安理工大学学报, 2004, (1): 58-62.
- [5] 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.
- [6] 厉易生, 朱伯芳, 林乐佳. 寒冷地区拱坝坝板保温层的效果及计算方法[J]. 中国农村水利水电, 1995, (7): 54-58.

Simulation analysis of temperature control of RCC gravity dam

L I Y ong-gang, L I Shou-yi

(Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: In this paper, three-dimensional finite element relocating mesh method is used to carry out the simulation of the temperature field and thermal stress field of the RCC dam during construction and operation period. The impact on thermal stress of concrete calorific and mechanical parameters varying with time, the process of dam body pouring by layers, the gravity of the dam and the water pressure have all been considered in calculation. In addition, thermal stress field was analyzed when cold wave occurs. The reliable basis for the dam design and for taking corresponding temperature control measures during the dam construction is provided.

Key words: RCC gravity dam; thermal stress; relocating mesh method; simulation analysis; cold wave