

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2009.01.012

基于施工条件的龙滩碾压混凝土重力坝温度应力仿真分析

冯树荣^{1,2} 胡志奇² 何建平² 张怡瑞²

(1.河海大学土木工程学院,江苏 南京 210098;2.中国水电顾问集团中南勘测设计研究院,湖南 长沙 410014)

摘要:根据龙滩大坝实际施工条件,采用三维有限元模型模拟了大坝浇筑和运行过程中的温度场和应力场,并与大坝原型观测资料进行了对比。结果表明,挡水和泄水坝段最高温度发生在二级配碾压混凝土和变态混凝土区,总体计算结果与实测资料基本一致,绝大多数位置的温度和应力满足设计要求,局部位置略有超标,主要为施工中层厚偏大、浇筑温度偏高引起,但仍然满足安全运行要求。

关键词:龙滩碾压混凝土重力坝;施工条件;温度应力;仿真

中图分类号:TV642.2 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-1980(2009)01-0057-05

龙滩碾压混凝土重力坝,最大坝高 216.5 m,一期坝高 192 m,一期大坝混凝土方量 580 万 m^3 ,其中碾压混凝土量 385 万 m^3 ,占混凝土总方量的 66%。大坝坝体不设纵缝,通仓浇筑,坝段横缝间距一般 20 m,最大坝底宽约 169 m,最大长宽比(L/B)达 8.5。

龙滩工程 2001 年开工建设,大坝于 2007 年底完成混凝土浇筑,一期工程于 2008 年完成。碾压混凝土坝的温控防裂是工程关键技术之一,设计阶段进行了大量的研究工作。研究过程中,根据工程自然条件、设计施工方案拟订和室内外混凝土试验成果,采用多种计算手段对温度应力进行了仿真分析。分析结果表明,不同计算手段下的温度应力分布规律基本一致。仿真计算的难点是对环境条件(如地质和气候等)、温控措施效果等的模拟和材料特性参数的采用。在工程建设过程中,大坝的实际施工参数(材料的热学、力学参数,浇筑时间,层间间歇,温控措施和外界气温等)与原设计拟定的施工方案都有一定的差异,为了了解大坝在实际施工过程中和运行期的温度场和应力场,为后续施工提供必要的参考资料,本文基于龙滩实际施工条件和材料参数,对典型挡水坝段和典型泄水坝段进行温度应力仿真分析。

1 计算模型和施工条件模拟

1.1 计算模型

采用三维有限元模型模拟大坝浇筑和运行过程,模型主要特点^[1-4]为:(a)能模拟材料时间依存特性,包括混凝土水化热、弹性模量、徐变、自生体积变形随时间的变化情况等;(b)能在不同时刻,根据混凝土施工的要求和进度,增加或减少浇筑层、边界条件、载荷条件等,从而可以模拟浇筑施工的全过程到蓄水和运行后 100 a,直至坝体内部达到稳定温度场,应力达到最大为止;(c)能模拟水化热的生成以及冷却水管、导热、外界气温和对流等边界条件随时间的变化情况,进行稳定温度场、准稳定温度场和不稳定温度场的分析;(d)在进行不稳定温度场分析的同时,进行热-结构作用分析,计算出任意时刻大坝内部的温度徐变应力场。

材料分区如图 1 所示。计算荷载考虑了温度荷载、水压荷载和自重荷载。

1.2 施工条件模拟

已经施工的部分,按照已有的施工参数(如浇筑时间、浇筑层厚、层间间歇、材料的性能参数、温控措施和施工条件等)进行模拟;未施工的部分,按照设计要求和不同的温控措施进行比较计算,以达到了解温控措施的效果,并确定温控措施。

对未施工或者缺乏记录时间段的气温,采用根据多年月平均气温拟合出的气温月份函数关系式转化而

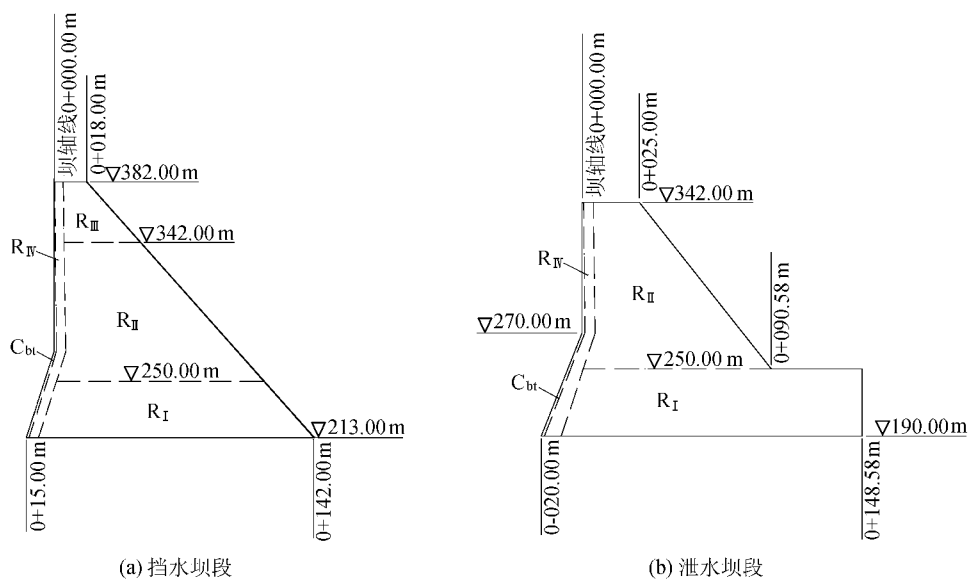


图 1 材料分区

Fig. 1 Zoning of materials

来的气温天数的函数关系式(式(1) 和式(2)) 进行计算.

温度 T 与月份 t 的函数关系式^[1-2]为

$$T = 20.1 + 8.05\cos\left[\frac{\pi}{6}(t - 7)\right] \tag{1}$$

温度 T 与天数 d 的函数关系式^[1-2]为

$$T = 20.1 + 8.04\cos\left[\frac{2\pi}{365}(d - 210)\right] \tag{2}$$

混凝土的热学性能根据实际采用的配合比及相应试验资料确定, 变形等力学性能根据现场和室内试验资料拟合确定, 结果见表 1.

表 1 混凝土热学指标

Table 1 Thermal indices of concrete

热学指标	导温系数 $a/$ ($\text{m}^2 \cdot \text{h}^{-1}$)	导热系数 $\lambda/$ ($\text{kJ} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{h}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	比热容 $c/$ ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$)	线膨胀系数 $\alpha/^\circ\text{C}^{-1}$	绝热温升 $\Delta(\tau)/^\circ\text{C}$	弹性模量/ 10^4 MPa
常态混凝土 C20(CI)	0.003 704	8.776	0.967 2	0.7×10^{-5}	$\frac{23.3\tau}{1.007 + \tau}$	$4.1(1 - e^{-0.6\tau^{0.42}})$
下部 R_I	0.003 993	9.270	0.967 2	0.7×10^{-5}	$\frac{21.6\tau}{3.10 + \tau}$	$\frac{4.3\tau}{6.2 + \tau}$
中部 R_{II}	0.003 993	9.270	0.967 2	0.7×10^{-5}	$\frac{17.9\tau}{2.90 + \tau}$	$\frac{4.4\tau}{11.5 + \tau}$
上部 R_{III}	0.003 993	9.270	0.967 2	0.7×10^{-5}	$\frac{16.2\tau}{2.07 + \tau}$	$\frac{4.2\tau}{10.5 + \tau}$
上游面 R_{IV}	0.003 993	9.270	0.967 2	0.7×10^{-5}	$\frac{24.1\tau}{2.6 + \tau}$	$\frac{4.64\tau}{6.02 + \tau}$

注: τ 表示龄期.

2 温度场仿真计算

计算表明:挡水坝段 R_I 区,最高温度在 $29.00 \sim 32.00^\circ\text{C}$ 之间;在 R_{II} 和 R_{III} 区,最高温度在 $31.20 \sim 37.00^\circ\text{C}$ 之间;在上游迎水面 R_{IV} 区附近,最高温度在 $35.00 \sim 41.00^\circ\text{C}$ 之间.泄水坝段 R_I 区,最高温度在 $33.00 \sim 35.00^\circ\text{C}$ 之间;在 R_{II} 和 R_{III} 区,最高温度在 $33.55 \sim 36.02^\circ\text{C}$ 之间;在上游迎水面 R_{IV} 区附近,最高温度在 $35.00 \sim 39.46^\circ\text{C}$ 之间.2 个坝段各高程计算与实测最高温度比较如表 2 所示.计算与实测最高温度差的绝对值的平均值为 1.06°C (挡水坝段)和 1.45°C (泄水坝段).计算与实测温度的差别在于计算参数与实际尚有一定差异,计算精度等也有一定影响.图 2 是挡水坝段典型高程处典型节点的温度过程线,可知各点温度达到最高值后,随时间逐渐平稳下降.

表 2 挡水坝段和泄水坝段各高程计算与实测最高温度比较

Table 2 Comparison between the maximum computed and measured temperatures at various elevations of dam retaining and discharging sections							
坝段	高程/m	计算 点数	实测 点数	计算最高 温度/℃	实测最高 温度/℃	(实测最高温度 – 计算最高温度)/℃	实测最高温度 – 计算最高温度 实测最高温度 /%
挡水坝段	230.00	8	8	35.14	37.00	1.86	5.0
	242.00	4	3	34.52	33.10	- 1.42	- 4.3
	255.00	6	6	34.17	34.00	- 0.17	- 0.5
	270.00	6	2	31.20	31.70	0.50	1.6
	283.00	5	5	35.77	37.75	1.98	5.2
	295.00	5	5	41.42	40.60	- 0.82	- 2.0
	305.00	5	5	41.18	40.50	- 0.68	- 1.7
泄水坝段	190.00	4	4	29.95	29.40	- 0.55	- 1.9
	193.00	6	6	31.60	32.35	0.75	2.3
	200.00	11	12	34.00	33.55	- 0.45	- 1.3
	210.00	11	17	31.00	34.45	3.45	10.0
	235.00	10	11	33.90	36.45	2.55	7.0
	247.00	9	9	34.10	33.15	- 0.95	- 2.9

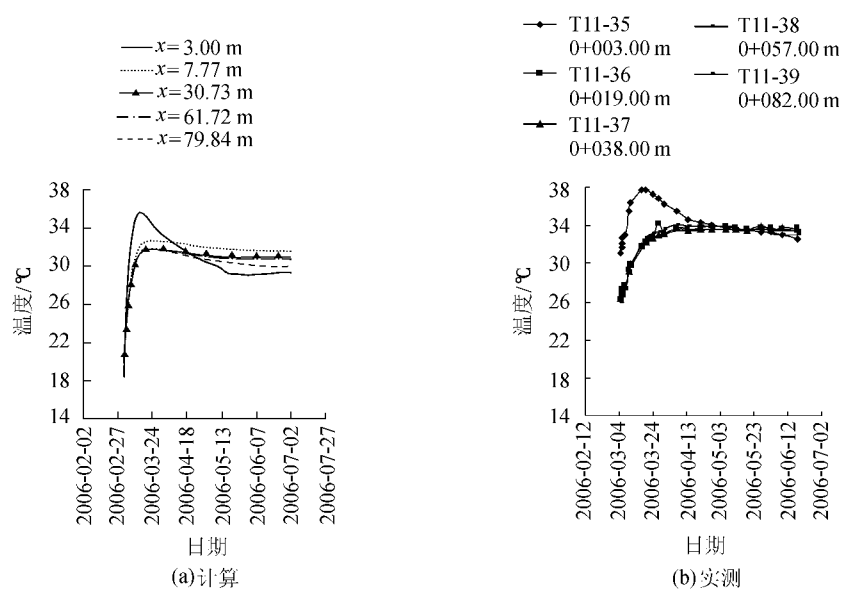


图 2 挡水坝段高程 283.00 m 处典型位置的温度历时曲线

Fig. 2 Temperature duration curves at typical location of dam retaining section (elevation 283.00 m)

3 应力场仿真计算

3.1 顺河流向应力 σ_x

挡水坝段约束区(R_I 区)内最大应力在高程 242.80 m 和 260.50 m 的位置及其附近的区域 ,当坝体内部温度达到稳定温度场的温度时 ,最大应力分别为 1.56 MPa 和 1.48 MPa. 泄水坝段约束区(R_I 区)内最大应力位置在高程 195.20 m 和 206.70 m 及其附近的区域 ,最大应力分别为 2.43 MPa 和 2.60 MPa. 计算结果表明 ,最大应力产生的位置 ,挡水坝段位于强约束区与弱约束区过渡的位置 ,泄水坝段位于强约束区. 随着时间的增加 , σ_x 在 40 ~ 70 a 后基本达到稳定. 挡水和泄水坝段典型位置的应力 σ_x 随时间变化的曲线如图 3 所示 .

3.2 坝轴线向应力 σ_y

对于坝轴线向的应力 σ_y ,最大应力发生在上游迎水面和下游背水面附近 ,时间为施工期和蓄水初期. (在寒潮作用下)挡水坝段最大应力在 1.38 ~ 1.77 MPa 之间 ,泄水坝段的最大应力在 1.70 ~ 2.05 MPa 之间. 典型位置的应力 σ_y 历时曲线如图 4 所示 .

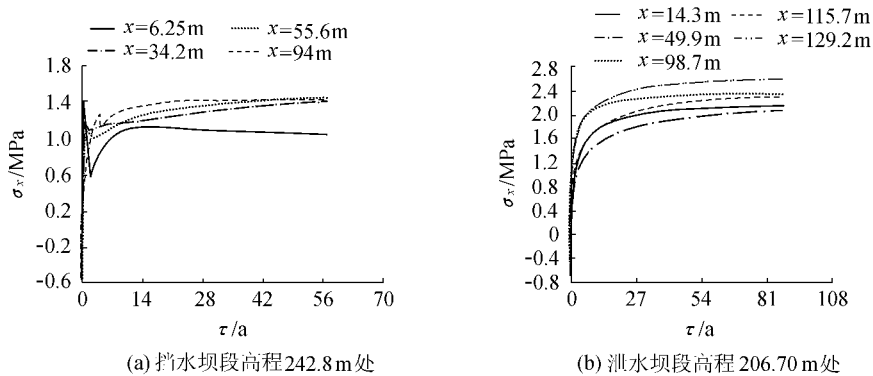


图 3 典型位置的应力 σ_x 历时曲线

Fig. 3 Duration curves of stress σ_x at typical location

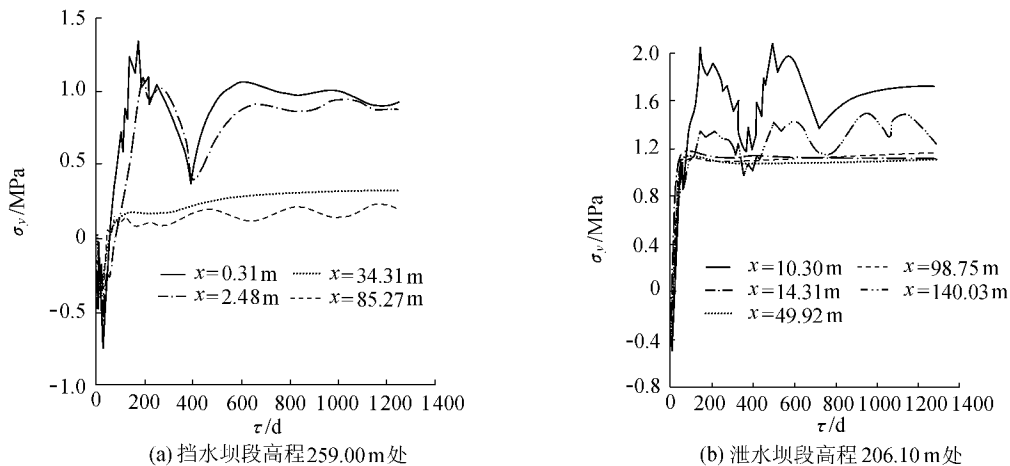


图 4 典型位置的应力 σ_y 历时曲线

Fig. 4 Duration curves of stress σ_y at typical location

3.3 垂向应力 σ_z

以压应力为主,寒潮作用下,上游迎水面和下游背水面附近也会产生较大的拉应力.若只考虑温度荷载的作用,不考虑重力和水压力的作用(方案1),挡水坝段最大应力在1.86~2.34 MPa之间,泄水坝段最大应力在1.32~1.94 MPa之间,若同时考虑温度荷载以及重力和水压力的作用(方案2),挡水坝段最大应力在1.15~1.80 MPa之间,泄水坝段最大应力在0.50~1.07 MPa之间.应力 σ_z 最大值及其位置和产生时间如表3所示.

表 3 应力 σ_z 最大值及其位置和产生时间

Table 3 Maximum values of stress σ_z and corresponding occurrence time				
应力部位	方 案	最大应力值/MPa	最大应力位置	最大应力产生时间
挡水坝段	1	方案 1 1.87	上游迎水面,高程 215.30 ~ 223.80 m	2005-12-07
		方案 2 1.15		
	2	方案 1 1.86	上游迎水面,高程 275.00 ~ 310.00 m	2006-03-10
		方案 2 1.60		
	3	方案 1 2.34	下游背水面,高程 213.00 ~ 256.60 m	2006-01-28
		方案 2 1.80		
泄水坝段	1	方案 1 1.32	上游迎水面,高程 226.27 ~ 244.34 m	2006-02-08
		方案 2 0.50		
	2	方案 1 1.82	$x = -11.08 \sim 4.98$ m, $z = 193.73 \sim 226.29$ m	2005-08-27
		方案 2 1.07		
	3	方案 1 1.94	$x = -0.90 \sim 5.26$ m, $z = 248.83 \sim 260.74$ m	2011-12-20(不考虑重力和水压), 2006-03-28(考虑重力和水压)
		方案 2 0.83		

4 结 语

- a. 由于二级配碾压混凝土 R_{IV} 区和变态混凝土 C_{bt} 区比坝体 R_I 和 R_{II} 区的绝热温升高、发热速率大,因而最大温度往往产生在靠近上游迎水面 $2 \sim 8\text{ m}$ 处^[5-7].在同一高程位置,若不采取通水冷却措施,上游迎水面附近比中间部位的温度高 $3 \sim 5^\circ\text{C}$.若考虑了冷却水效果,上游迎水面附近比中间部位的温度高 $2 \sim 3^\circ\text{C}$.
- b. 2 个坝段的最高温度分别达到了 41.38°C 和 39.55°C ,都出现在二级配碾压混凝土的 R_{IV} 区.局部位置温度和应力略有超标,主要是施工中局部部位层厚偏大和浇筑温度偏高引起.
- c. 碾压混凝土坝由于没有后期冷却,混凝土自身散热慢,很长时间内,大坝内部都处于高温状态^[8-10].而在施工期的冬季和蓄水后的初期,大坝表面温度较低,一段时间内会在表面产生较大的拉应力(σ_y 和 σ_z).随着大坝内部温度的下降,在大坝内部顺河流方向应力 σ_x 不断增加,最终达到一个稳定值.若这些拉应力超过了当时的混凝土抗拉强度,就会引发裂缝的产生.因此,应该加强大坝施工期的表面保护和大坝蓄水后的坝内渗透水压和渗流量的观测.

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] 孙恭尧,王三一,冯树荣.高碾压混凝土重力坝[M].北京:中国电力出版社,2004.

[3] 朱岳明,秦宾,张建武,等.基于生长单元网格浮动的碾压混凝土坝温度场分析[J].河海大学学报:自然科学版,2002,30(5) 28-32.

[4] 张子明, GARGA V K.碾压混凝土坝的温度应力[J].河海大学学报,1995,23(3) 8-14.

[5] 贺金仁,朱岳明,冯树荣,等.龙滩高碾压混凝土重力坝的温控防裂研究[J].红水河,2003(1) 8-13.

[6] 姜冬菊,张子明,宋培玉.龙滩碾压混凝土重力坝温度应力研究[J].红水河,2001(2) 51-56.

[7] 张国新,赵仕杰,梁建文.龙滩碾压混凝土重力坝高温季节施工的温度应力问题[J].水力发电,2005,31(3) 39-41.

[8] 蔡为武.碾压混凝土坝温控防裂探讨[J].水利水电科技进展,2000,20(2) 28-31.

[9] 任旭华,缪忠.碾压混凝土重力坝的安全评价方法和安全标准的研究[J].河海大学学报,1998,26(4) 8-13.

[10] 舒光胜,周厚贵.景洪电站碾压混凝土工程温控措施效果分析[J].水利水电科技进展,2007,27(2) 55-57.

Simulation of thermal stress of Longtan RCCD based on construction conditions

FENG Shu-rong^{1,2}, HU Zhi-qi², HE Jian-ping², ZHANG Yi-rui²

(1. College of Civil Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China ;

2. Mid-South Design and Research Institute, CHECC, Changsha 410014, China)

Abstract : The three-dimensional finite element method was employed to simulate the thermal and stress fields during the pouring and operation of Longtan Roller Compacted Concrete Gravity Dam according to its actual construction conditions. The results were compared with the prototype monitoring data. It is shown that the maximum temperatures of dam retaining and discharging sections lie in the distorted concrete area and the two-graded compacted RCC area. The computed results are in accordance with the measured ones. The temperature and stress situation in most locations can satisfy the design requirements. Although they have a little excess in some locations with thicker layer and high pouring temperature during construction, they can satisfy the requirements of safe operation.

Key words : Longtan Roller Compacted Concrete Gravity Dam ; construction condition ; thermal stress ; simulation