DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2016.06.26

某碾压混凝土重力坝施工温控措施研究

漆焕然,李守义,张晓飞,顾冬冬 (西安理工大学水利水电学院,陕西西安710048)

摘 要:在碾压混凝土坝施工和运行期间防止裂缝的产生是需要考虑和控制的重要问题,对具体温控措施进行研究可为以后提供重要的技术指导。以某碾压混凝土重力坝工程为例,利用大型有限元软件 ANSYS 进行建模,采用三维有限元浮动网格法模拟碾压混凝土坝的施工过程,根据工程施工进度和碾压混凝土的热力学参数,针对浇筑温度、通水冷却措施,初拟了3个温控方案,对各个方案的温度场和应力场进行计算分析。结果表明:高温季节进行混凝土浇筑对坝体温度和应力影响较大,极容易造成裂缝;通过控制浇筑温度和通水冷却措施,坝体最高温度得到了有效的降低,最大应力基本满足碾压混凝土坝容许应力要求。此研究成果可为类似工程的温控设计提供参考。

Research on temperature control measures in construction of a roller – compacted concrete gravity dam

QI Huanran, LI Shouyi, ZHANG Xiaofei, GU Dongdong

(Faculty of Water Resources and Hydroelectric Engineering, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: During the construction and operation of roller – compacted concrete (RCC) gravity dam, to control the generation of cracks is a key problem to consider. The study of specific temperature control measures can provide a important technical guidance for the future. Taking an instance of a RCC gravity dam project, the large – scale software ANSYS was used to establish models, and the three – dimensional finite element relocating mesh method was used to simulate the RCC dam construction process. According to the project construction progress and thermodynamic parameters of the compacted concrete, against the measures of pouring temperature and water cooling, three temperature control schemes were proposed pre-liminary, and the temperature and stress of each scheme were analyzed. The results showed that, in the high temperature seasons, to pour concrete had greater influences on the temperature and stress of the dam body, which easily induced cracks. By controlling the measures of pouring temperature and cooling with water, the maximum temperature decreased effectively, and the dam maximum stress met the requirement of permitted stress for roller – compacted concrete dam. This research can provide references for the temperature control designs of similar projects.

Key words: concrete RCC dam; temperature field; temperature stress; temperature control measures

碾压混凝土重力坝一般具有大仓面通仓薄层、 连续快速施工、上升速度快和层面间歇时间短的特 点,坝体内部的热量很难通过浇筑层面散发出来,因 此会产生较大的内外温差,混凝土坝体极易产生裂 缝。此外,碾压混凝土重力坝常在建基面上浇筑常 态混凝土垫层,基础灌浆期间停歇时间较长,裂缝也 很容易产生。所以为了尽可能的避免坝体中出现裂 缝,有必要对碾压混凝土坝的温度场和温度应力场 进行计算分析,并提出相应的温控措施^[1-4]。

碾压混凝土坝应用的时间较短,研究和实践的

147

经验累积不多,近年碾压混凝土坝的温控有日趋复 杂的趋势,仍有许多温控问题有待解决。张国新^[5] 分析碾压混凝土坝温度控制得出了采用薄层碾压的 方式,混凝土入仓温度回升快,可采用喷雾、盖保 温被、快速覆盖等方法降低高温季节的浇筑:朱伯 芳^[6]利用预冷集料和水管冷却加快高碾压混凝土 重力坝的施工速度;白新理等^[7]在研究水管冷却对 三峡船闸混凝土底板温度应力时得出影响冷却效果 的主要因素有水管管距、通水水温和通水时间:王福 林等[8]研究了严寒地区表面保温对碾压混凝土重 力坝表面温度的影响;混凝土浇筑层厚度和层间间 歇时间对温度应力有显著的影响,也会影响坝体的 施工工期^[9-10]:采用层平摊法浇筑提高 RCC 的铺 筑速度;防止预冷混凝土吸热过快^[11]。因此,研究 浇筑温度、通水冷却对实际工程温度场和徐**变**应力 场的影响,并总结出一些具有实际应用价值的规律, 为实际工程提供有益的指导。

本文利用 ANSYS 有限元大型软件^[12]进行建 模,根据工程施工进度以及提供的热力学参数,运用 三维有限元浮动网格法^[13-15]模拟碾压混凝土的浇 筑过程,对碾压混凝土重力坝采用无温度控制措施 方案、通水冷却方案、控制浇筑温度和通水冷却方案 进行了仿真计算分析,给出了坝体温度和应力变化 规律。

1 基本资料

1.1 工程概况

某工程为碾压混凝土重力坝,大坝由左右非溢 流坝段和河床溢流坝段组成,坝顶全长146.4 m,其 中左、右岸非溢流坝段分别长47.7 m和46.7 m,河 床段为堰顶设有闸门的溢流坝段,长52 m。溢流坝 段的坝基面高程为830.0 m,堰顶高程884.4 m,坝 底宽度为56.5 m。拦水坝基础垫层河床部位为1.5 m厚的C15 三级配常态混凝土,两岸为1.0 m厚的 C15 三级配常态混凝土,上游面采用0.5 m厚C20 二级配变态碾压混凝土,非溢流坝下游面采用0.5 m厚 C15 三级配常态混凝土,坝顶采用1.5 m厚C20 二 级配常态混凝土;溢流坝段台阶溢流面(1.0 m× 0.8 m)采用C30 二级配变态混凝土,闸墩采用C30 常态混凝土。溢流坝段体积大,故选择溢流坝段进 行计算分析。

1.2 计算资料

云河水利水电枢纽工程坝址区气象资料,某县 1984-2014年平均各月气温见表1,大体积混凝土 热学性能参数试验成果见表2。

表1										L	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2.9	6.0	13.1	16.5	20.5	24.5	25.9	26.7	21.2	17.1	9.2	3.9

十体和泪版上却兴快的光度主

我之一八种你成成工 派于任的风湿风未来								
	YH - 5	YH – 14	YH – 29					
材料	二级配碾压混凝土	三级配碾压混凝土	二级配常态混凝土					
	(C ₉₀ 20W8F150)	(C ₉₀ 15W6F100)	(C25W8F150)					
绝热温升/℃	T = 24.10t/(t + 2.403)	T = 20.79t/(t + 2.701)	T = 42.74t/(t + 0.932)					
比热/(kJ・kg・℃ ⁻¹)	0.9673	0.9517	1.0021					
导温系数/(m ² ・h ⁻¹)	0.003022	0.003015	0.003045					
导热系数/(W・m ⁻¹ ・h ⁻¹ ・℃ ⁻¹)	7.042	6.950	7.125					
摩擦系数	1.597	1.436						
黏聚力/MPa	1.637	1.523						

常态混凝土和碾压混凝土的徐变参数分别为:

$$C(t,\tau) = 5.93(1+9.20\tau^{-0.45}) \left[1 - e^{-0.30(t-\tau)}\right] + 13.4(1+1.70\tau^{-0.45}) \left[1 - e^{-0.005(t-\tau)}\right]$$
(1)

$$C(t,\tau) = (10.87 + 100\tau^{-0.45}) [1 - e^{-0.30(t-\tau)}] + (24.575 + 41.7774\tau^{-0.45}) [1 - e^{-0.005(t-\tau)}]$$
(2)

式中: $C(t,\tau)$ 为徐变度, 10^{-6} /MPa; τ 为混凝土加荷 时间,d; $(t - \tau)$ 为混凝土持荷时间,d。

2 计算模型及边界条件

计算模型取横缝之间的整个溢流坝段。整体坐标系的坐标原点在坝段右侧坝踵处。坝轴线横河方向右岸为 x 轴正向,顺河下游方向为 y 轴正向,铅直向上为 z 轴正向。模型中地基的延伸深度按照规范要求选取坝高的 1~1.5 倍,所以在坝基深度方向、上游方向、下游方向各取 100 m。坝体单元均采用 8节点六面体等参数单元,整个坝体模型共剖分单元36 270 个,节点 41 426 个,其中坝体单元 27 378 个,节点 31 374 个。计算模型见图 1。



图1 溢流坝段模型

温度场分析选取的计算边界条件:地基底面和 4 个侧面以及坝段横缝面为绝热边界,坝体上下游 面在水位以上为固 – 气边界,在水位以下为固 – 水 边界。固 – 气边界按第三类边界条件处理,固 – 水 边界按第一类边界条件处理。应力计算的边界条 件:地基底面按固定支座处理,地基在上下游方向按 y向简支处理,其余为自由边界。

3 温控计算方案

方案1:自然入仓浇筑。2015年11月30日开 始浇筑基础垫层常态混凝土,2015年12月15日开 始固结灌浆施工,2016年1月19日完成固结灌浆。 2016年1月20日开浇碾压混凝土,至2016年6月 6日浇筑至高程851.0m,2016年6月10日至2016 年9月30日因度汛停止大坝混凝土浇筑。2016年 10月17日恢复碾压混凝土施工,至2016年12月 20日,浇筑至堰顶高程884.4m。水库的蓄水过程 为:2017年1月1日库水位为850.0m;2017年3月 31日库水位为871.0m;2017年6月30日,水库蓄 水到正常蓄水位890.4m;2017年1月1日,水库下 游水位为840.67m。

方案 2: 自然人仓浇筑, 通水冷却。该方案对 2016 年 5 月、6 月和 10 月浇筑的混凝土采取通水冷 却,通水冷却时间为15天,冷却温度为当月河水温度,大层浇筑完立即通水。水管距离为1.5m×1.5 m,水流流量为1.0m³/h,单根水管长度为250m。 其他条件同方案1。

方案3:控制浇筑温度和通水冷却。该方案控制混凝土浇筑温度小于等于18℃。其他条件与方案2相同。

4 温度场计算成果分析

按照设计的施工进度,从第1年11月30日开 始浇筑基础垫层常态混凝土,第2年12月底达到坝 顶。通过坝体温度场的仿真分析计算,可以得出以 下结论:

(1)坝体表面温度变化较大,坝体内部的温度 梯度小,这是因为周围环境气温和水库水温对坝体 表面影响较大,对坝体内部影响较小;坝体最高温度 值只与坝体浇筑温度、外界气温以及混凝土的龄期 有关,随着时间不断变化,坝体内部温度不断降低, 最后接近坝体稳定温度13.5℃(见图2c)。

(2)由于混凝土水化热的影响,坝体中心断面 随着坝体的浇筑上升不断出现最高温度区域,且随 着坝体的浇筑不断上升。高温区域均出现在6-9 月浇筑的部位以及刚刚浇筑不久的部位;从表3可 以看出:各个方案出现的最高温度都在常态混凝土 C30的溢流面上,高达36.5℃(见图2a),原因是位 于表面的C30二级配混凝土水化热温升较坝体内 部三级配碾压混凝土绝热温升要高。

(3)图2b为运行期7月30日的温度等值线图, 低温区出现在坝体上游侧坝踵部位,7月份水库水 温为9.7~29.9℃,平均气温为24.7℃,混凝土下游 表面为22~25℃,与气温基本一致;上游温度偏低 主要是受到了坝体运行期蓄水的影响。

(4) 从温度历时曲线图 3 可以看出, 各个计算 方案的最高温度在混凝土龄期 5~10 d 后急剧下 降, 从 6 月 10 日至 9 月 30 日期间坝体处于度汛阶 段, 度汛期间, 坝体上游面温度接近水库水温。

(5) 从表 3 可以看出,在 5 - 9 月浇筑的部位 (即 841.3~852.6m 高程),对坝体埋设冷却水管进 行初期冷却,方案 2 通水冷却后使坝体弱约束区最 高温度较方案 1 降低 4.2℃,方案 3 采取控制浇筑 温度和通水冷却,使坝体的最高温度较方案 1 降低 6.6℃。

本文仅给出坝体中心剖面不同时段的温度云 图,见图2。



图 2 不同时段溢流坝体中心剖面温度云图

图 3 溢流坝段各方案高程 851.0m 水平面典型点温度历时曲线

计算 方案	最高温度 和允许温度	基础垫层常态 混凝土 (830.0~831.5m)	强约束区碾压 混凝土 (831.5~841.3m)	弱约束区碾压 混凝土 (841.3~852.6m)	非约束区碾压 混凝土 (852.6~877.4m)	溢流面常态 混凝土 (850~884.4m)
古安 1	最高温度	24.4	27.6	36.6	32.9	36.5
	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
刀术 1	最大温差	10.9	14.1	23.1	19.4	23.0
	基础容许温差	14.0 ~16.0	12.0 ~14.5	14.5 ~16.5		
	最高温度	24.4	27.6	32.4	32.9	36.5
古安)	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
刀杀 4	最大温差	10.9	14.1	18.9	19.4	23.0
	基础容许温差	14.0 ~16.0	12.0 ~14.5	14.5 ~16.5		
	最高温度	24.4	27.6	30.0	32.9	36.5
士安 3	稳定温度	13.5	13.5	13.5	13.5	13.5
刀杀 5	最大温差	10.9	14.1	16.5	19.4	23.0
	基础容许温差	14.0 ~16.0	12.0 ~14.5	14.5 ~ 16.5		

 $^{\circ}$ C

5 温度应力场计算成果分析

分析3个方案的坝体应力场计算结果:

(1)坝体各个方向的最大拉应力都发生在溢流 面常态混凝土,方案1、方案2施工期间顺河向最大





(2)由表4可以看出,顺河向和铅直向最大应 力都发生在坝体浇筑完的低温季节,而横河向最大 应力发生在坝体浇筑完的高温季节;各计算方案溢 流面常态混凝土的最大拉应力均大于常态混凝土 C15W8F100的180d龄期的允许应力值,由于溢流 面常态混凝土部位应力值较大,因此需要表面附近 采用钢筋混凝土。

(3)施工期弱约束区最大拉应力出现在长间歇面 高程 851.0 m 附近;上游面坝踵附近,温度铅直向应力 值相对较大,可能是由于应力集中引起的,见图 4。 温度应力均大于三级配碾压混凝土相应龄期的允许 应力值,只有方案3满足设计要求;当坝体蓄水后, 由于水压力和水库低温的影响,坝体非约束区顺河 向应力以及坝面常态混凝土铅直向拉应力显著增加 (见表4)。



图 5 溢流坝段高程 851.0 m 水平面典型点温度应力历时曲线

(4) 通过对 2016 年 5 月和 6 月浇筑的部位(弱 约束区) 控制浇筑温度和通水冷却后,可使坝体混 凝土温度得到有效降低。方案 3 弱约束区最大拉应 力分别比方案 2 减小 0.1 MPa,比方案 1 减小 0.27 MPa。

(5)从历时曲线图 5 可知:当外界温度随着时 间变化时,坝体上下游面的应力简谐变化,当外界环 境温度低时为拉应力,外界环境温度高时为压应力, 应力值在-1.5~1.5 MPa 之间变化;而坝体内部应 力则随着时间不断缓慢增大,30 a 后趋于稳定。 第6期

表 4 溢流坝各方案不同部位最大拉应力计算成果表

MPa

	浅姑	横河向			顺河向			铅直向		
计算方案	远现 范围/ m	浇筑期 最大拉 应力	发生时间 及部位	蓄水以及 运行期最 大拉应力	浇筑期 最大拉 应力	发生时间 及部位	蓄水以及 运行期最 大拉应力	浇筑期 最大拉 应力	发生时间 及部位	蓄水以及 运行期最 大拉应力
	垫层	1.02		1.09	1.03		1.40	1.45		1.48
	831.5 ~ 841.3	1.28	坝体浇	0.84	0.47	浇 筑 完	0.86	1.25	坝体浇	1.27
1	841.3 ~852.6	0.89	筑完第2	0.92	<u>1.22</u>	的第1	1.39	<u>1.37</u>	筑完第2	<u>1.53</u>
1	852.6~877.4	0.88	年 7 月	1.09	0.49	年 12 月	1.11	0.48	年1月	1.66
	溢流面常态 850.0~884.4	2.28	份	2.48	2.45	份	2.52	0.49	末	1.89
	垫层	1.02		1.09	1.03		1.40	1.45		1.48
	831.5 ~ 841.3	1.28	坝体浇	0.84	0.47	浇 筑 完	0.86	1.25	坝体浇	1.27
2	841.3 ~852.6	0.81	筑完第2	0.83	<u>1.15</u>	的第1	1.22	<u>1.2</u>	筑完第2	1.47
Z	852.6~877.4	0.84	年 7 月	1.01	0.25	年 12 月	1.04	0.45	年1月	1.64
	溢流面常态 850.0~884.4	2.28	份	2.48	2.45	份	2.52	0.49	末	1.89
3	垫层	1.02		1.09	1.03		1.40	1.45		1.48
	831.5 ~ 841.3	1.28	坝体浇	0.84	0.47	浇 筑 完	0.86	1.25	坝体浇	1.27
	841.3 ~852.6	0.75	筑完第2	0.78	0.96	的第1	1.12	1.12	筑完第2	1.40
	852.6~877.4	0.81	年 7 月	0.98	0.21	年 12 月	1.00	0.41	年1月	1.60
	溢流面常态 850.0~884.4	2.28	份	2.45	2.45	份	2.52	0.49	末	1.89

注:有下划线的数字代表该区域最大拉应力超过相应混凝土龄期的应力允许值。

6 结 论

(1)混凝土浇筑时的环境气温对坝体温度有很 大影响,坝体内部温度基本与外界气温无关,最大温 升主要取决于混凝土的浇筑温度和浇筑季节,而在 低温季节浇筑的部位温度低。

(2)方案2采取初期通水冷却浇筑完后立即通 水 15 d,可将坝体最高温度降低 4.2℃,可见通水冷 却的效果是显著的。

(3)方案3采取控制浇筑温和通水冷却措施 后,可将坝体最高温度降低6.6℃,最大应力基本满 足容许应力要求。因此,需要严格控制高温季节混 凝土浇筑温度。如有可能,尽量采取夏季高温季节 停工措施,以减小坝体最高温度和最大拉应力。

本文仅研究了通水冷却,浇筑温度对坝体温度 应力的影响,由于采用的坝体温控措施有越来越复 杂的趋势,如表面流水养护、外掺 MgO、加保温材料 抵御寒潮等措施,在工程中有时一些温控措施是共 同采用的,这些在后期还有待于进一步研究。 计算参数的准确性直接影响到仿真计算分析结 果的可靠性,今后可以将模拟结果和实际工地测量 结果分析比较,进行参数反演计算,进而论证仿真分 析研究的正确性,为碾压混凝土坝在施工期间的温 控设计提供更准确的依据。

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] 潘家铮.水工建筑物的温度控制[M].北京:水利电力出版社,1990.
- [3] 朱伯芳. 混凝土坝温度控制与防止裂缝的现状与展望 [J]. 水利学报,2006,37(12):1424-1432.
- [4] 张晓飞,白继中.碾压混凝土拱坝温度场和应力场仿真 计算研究[J].人民黄河,2014,36(1):100-103+106.
- [5] 张国新.碾压混凝土坝的温度控制[J].水利水电技术, 2007,38(6):41-46.
- [6]朱伯芳.利用预冷集料和水管冷却加快高碾压混凝土重 力坝的施工速度[J].水利水电技术,2001,32(3):11-14.

- [7] 白新理,黄和法,杨耀红,等.水管冷却对三峡混凝土船 闸底板温度应力的影响研究[J].华北水利水电学院学 报,2000,21(3):8-11.
- [8] 王福林,杜士斌.严寒地区碾压混凝土重力坝的温度裂 缝及其防治[J].水利水电技术,2001,32(1):60-62.
- [9] 左红军. 某碾压混凝土重力坝温控措施研究[J]. 四川水 利发电,2010,29(5):4-11.
- [10] 刘 健,董福品. 混凝土性能参数对坝体温度应力影响 的敏感性分析[J]. 水力发电,2015,41(6):77-80.
- [11] 赵凤华. 温控措施对碾压混凝土坝温度应力场的影响 研究[D]. 西安:西安理工大学,2011.
- [12] Li Shouyi, Chen Yaolong, Zhang Xiaofei, et al. Study on
 - (上接第145页)
- [3] 李 伟,曾兼权,赵世明,等.四川省蓬安县鲜店水库枢纽 除险加固工程初步设计报告[R].成都:四川大学水电 学院,2008.
- [4] 周兴波.有限元法在拱坝坝肩稳定及应力分析中的应用 研究[D].西安:西安理工大学,2013.
- [5]朱伯芳,高季章,陈祖煜,等. 拱坝设计与研究[M].北 京:中国水利水电出版社,2002.
- [6] 毛坚强.接触问题的一种有限元计算方法及其在岩土工程中的应用[D].成都:西南交通大学,2002.
- [7] 张正海, 董羽蕙. 裂缝模型及其在 ANSYS 中的模拟 [J]. 山西建筑,2005,31(24):49-50.
- [8] 杨宝全,陈媛,张林,等.基于地质力学模型试验的锦屏 拱坝坝肩加固效果研究[J].岩土力学,2015,36(3):819
 - 826.
- [9] 李 野,罗先启. 基于矢量和安全系数法的乌东德拱坝坝

contraction joints for the Longtan RCC gravity dam [J]. Dam Engineering, 2004, 10(4):295 - 307.

- [13] Chen Yaolong, Wang Changjiang, Li Shouyi, et al. Simulation analysis of thermal stress of RCC dams using 3D finite element relocating mesh method [J]. Advances in Engineering Software, 2001, 32(9):677-682.
- [14] Ren Jinke, Li Shouyi, ZhaoLijuan, et al. Research on the effect of cooling pipe of RCC gravity dam[J]. Dam Engineering, 2008, 19(1):29-38.
- [15] Zhu Bofang , Xu Ping. Methods for stress analysis simulating the construction process of high concrete dams [J]. Dam Engineering, 2001, 12(4):243 - 260.

肩稳定性分析与评价[J].水电能源科学,2013,31 (10):53-56.

- [10] 张景奎,张燎军,朱颖儒,等.一种基于安全因子判据的 坝肩裂隙岩体动力抗滑稳定分析方法[J].岩土力学, 2012,33(7):2160-2166.
- [11] 陈卫忠,朱维申,邱祥波,等.小湾水电站拱坝坝肩岩体 加固方案分析研究[J].岩石力学与工程学报,2002, 21(3):374-378.
- [12] 吴海林,李昌刚,周宜红,等.长塘电站拱坝有限元应力 分析及坝肩稳定研究[J].人民长江,2009,40(1):49-51.
- [13] 宁 宇,徐卫亚,郑文棠,等. 白鹤滩水电站拱坝及坝肩 加固效果分析及整体安全度评价[J]. 岩石力学与工程 学报,2008,27(9):1890-1898.