

文章编号:1672-3031(2019)02-0110-08

混凝土拱坝通水冷却同仓混凝土温差对坝体应力的影响

赵泽湖¹, 周秋景¹, 牟荣峰², 杨宁², 张家豪¹

(1. 中国水利水电科学研究院 结构材料研究所, 北京 100038; 2. 中国长江三峡集团公司, 北京 100038)

摘要: 针对混凝土拱坝浇筑过程中同仓混凝土不同区域温度存在差异问题, 定性分析了同仓温度差异原因, 采用仿真方法分析了同仓温差对坝体应力的影响。分析结果表明: (1)同仓混凝土温度存在差异主要原因有两种, 一是仓内各温度计埋设点与冷却水管距离不一致引起的测值差异; 二是冷却水管长度不同、施工过程中挤压变形不同导致流速流量差异。(2)不同温差形式对顺河向应力分布规律有一定影响, 最大应力均出现在仓块中间位置, 但向温度最低的区域有所偏移, 此外, 中上部出现温度最低的温差形式对坝体应力较为不利。(3)最小温度降幅一定时, 温差越大, 应力差异越明显, 温差每增大2~3℃, 顺河向应力和横河向应力均增大0.2~0.3 MPa左右。在保证各支温度计不出现较大幅度超冷情况下, 同仓温差对浇筑仓混凝土安全性能无明显影响。研究结果为拱坝温度应力控制及防裂措施提供了参考。

关键字: 拱坝; 仿真分析; 同仓温差; 温度应力

中图分类号: TV331

文献标识码: A

doi: 10.13244/j.cnki.jiwhr.2019.02.004

1 研究背景

拱坝混凝土拉应力^[1]主要源于温差及温差变化过程中外在的约束作用, 其中温差^[2]主要包括基础温差、内外温差和上下层温差, 这三种温差在拱坝设计和施工中受到普遍重视, 采取各种措施进行控制。除上述三种温差外, 还存在其它温度差异, 如目前在特高拱坝中, 300 m级特高拱坝坝体中下部厚度一般在50 m以上, 坝段宽度一般在20~25 m, 仓块面积达1000~1200 m²。在此情况下, 每一浇筑仓需要布置多根冷却水管, 混凝土在通水过程中, 热量被冷却水管带走, 距水管越近温度下降越快, 每一浇筑仓不同区域平均温度存在差异是必然的。传统拱坝测温是在典型坝段典型高程埋设少量永久温度计, 坝体温度依靠闷温检测成果, 该温度能够反映大坝浇筑仓块整体温度, 但无法给出内部各区域之间温度差异。目前大坝施工中, 为满足智能和安全控制, 坝体各坝段各仓均埋设温度计, 同时布设分布式光纤^[3]等线式温度计, 可以对大坝各仓温度分布和变化规律有比较全面和准确的认识。西南几座高拱坝施工期监测资料表明, 同仓温度存在差异的现象是普遍的, 一般一仓混凝土根据冷却水管布置可分为上中下游三个区, 各区之间温度差异最大可达到6~8℃, 一般也有2~3℃, 该温度差异会对大坝应力产生影响^[4]。针对同仓温度差异及影响问题, 朱伯芳^[5]分析了小湾拱坝同仓温度上中下三分区分批冷却温度差异3℃对应力的影响, 结果表明上下游温度梯度会带来附加拉应力, 最大约0.35 MPa, 远小于二冷及高度方向温差带来的拉应力。除此以外, 因监测条件等限制, 对同仓混凝土温差分布及量值的认识并不十分清楚, 对相应温度应力的研究也不充分^[6], 目前实际浇筑过程中同仓上下游温度控制缺乏一定的标准。

本文以我国西南某特高拱坝为例, 针对典型仓块冷却水管埋设及温度监测资料进行分析, 定性判断大坝混凝土同仓温差原因, 在此基础上, 采用有限元方法定量研究不同温差形式、不同温差大小对仓块应力的影响, 为拱坝施工过程中的温控防裂提供技术支撑。

收稿日期: 2017-11-16

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFB0201000); 中国长江三峡集团公司科研项目(WDD0431, WDD0432, XLD/2114);

国家自然科学基金项目(51579252, 51439005); 中国水科院基本科研业务费项目(SS0145B512017)

作者简介: 赵泽湖(1995-), 硕士生, 主要从事水工结构数值模拟研究。E-mail: zhaozehufn@163.com

2 某混凝土拱坝通水冷却概况

2.1 工程概况 西南某水电站位于四川会东县和云南禄劝县交界的金沙江河道，电站以发电为主，水电站装机容量 1000 MW，总库容 58.63 亿 m³，水电站坝址枢纽建筑物由混凝土双曲拱坝、地下厂房、左岸泄洪洞等组成。混凝土拱坝坝顶高程 988 m，最大坝高 270 m，拱冠梁顶厚 9.95 m，底厚 45.45 m，厚高比 0.172，坝顶上游面弧长 325.67 m，弧高比 1.23。坝体设横缝不设纵缝，共分 15 个坝段，横缝设接缝灌浆，陡坡坝段岸坡设接触灌浆，坝身共布置 5 个表孔 6 个中孔，混凝土总方量约 273 万 m³。

2.2 水管布置及温度计埋设 为满足拱坝有关温控标准和智能通水要求，拱坝各浇筑仓内埋设冷却水管和数字式温度计。图 1 分别为典型浇筑仓平面方向与垂直方向上的冷却水管与温度计布置示意图，整坝大部分采取该种布置形式，冷却水管采用高密度乙烯冷却水管，单根长度不超过 250 m，冷却水管埋设间距一般为 1.5 m×1.5 m，根据现场实际需要，同一高程多根冷却水管由一根主管供水，冷却水经另一主管引出，由于主管与多根冷却水管的连接部位均位于浇筑仓内部，即形成坝内“一拖多”的水管布置形式；大坝混凝土各仓均埋设施工期温度计进行混凝土内部温度测量，温度计埋设于两层冷却水管中间的上中下游区域(约长度方向 1/4 点)，在钢筋密集区等特殊部位适当增加温度计。

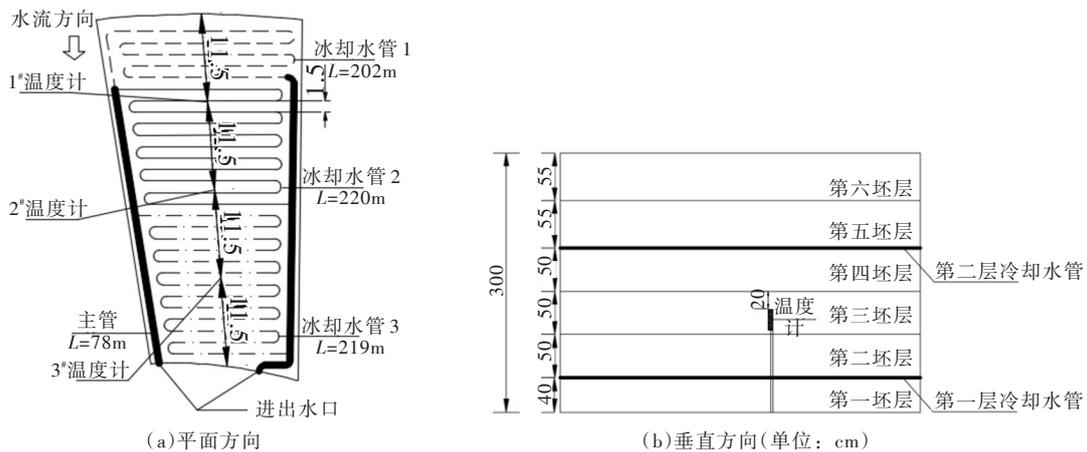


图 1 水管及温度计埋设

3 典型仓块温度监测分析

表 1 为大坝不同坝段不同仓块四个时间节点上中下游区域温度统计情况，各仓块在 9 月 10 日左右温度普遍在 22~25℃之间，基本达到初冷目标温度，同一仓混凝土不同区域最大差异约 3℃，为 7[#]-0009 仓；随着中期冷却和二期冷却的进行，各仓块不同区域温度普遍下降，但下降幅度存在差

表 1 浇筑仓上下游温度计读数(上游/中游/下游，单位：℃)

仓号	9月10日	11月2日	11月9日	11月13日	11月20日
5 [#] -0004	25.9/24.9/24	21.8/18.5/15.9	20.7/17.4/14.9	20.4/16.9/14.56	19.6/16.33/14.19
7 [#] -0002	24.1/24.4/23.4	17.3/19.8/16.8	16.59/18.1/15.49	16.4/17.5/15.3	15.2/16.63/14.2
7 [#] -0009	24.2/22.3/25.3	20.4/15.6/21.3	19.8/15.49/20.5	19.6/15.4/20.27	18.5/13.6/18.9
8 [#] -0005	24.8/24.3/23.8	19.6/17.7/16.5	18.41/16.1/15.51	17.81/15.21/14.64	16.9/14.3/13.9
8 [#] -0007	25/24.5/22.9	19.9/21.3/17.3	19.4/20.02/16.47	18.9/19.4/15.8	18.1/18.4/14.6
10 [#] -0002	24.4/23.3/23.8	17.7/15.1/19.8	15.7/13.72/18.6	15.1/13.8/18.1	13.9/13/17.19
10 [#] -0005	24.6/24.1/21.9	20.7/19.5/15.4	19.9/18.87/14.81	19.8/18.6/14.6	19.4/18.37/14.3
10 [#] -0006	25/24.1/23.3	20.2/15.2/18.4	20.31/18.4/17.9	20.5/18.6/17.89	20.67/18.8/17.19

异，至11月20日，最大温差约5.5℃，出现在5[#]-0004仓。在空间分布上，上游区温度一般偏高，下游和中游温度相对较低，但也有上游区温度偏低情况存在。总体来看，上游温度高中下温度低、中部温度高上下游温度低、下游温度高中上温度低等几种形式均有存在。

图2为典型仓块温度监测曲线，可知：(1)同仓混凝土温度变化总体趋势相同，升温 and 降温阶段基本一致；(2)相同时间内不同区域混凝土温度变化幅度存在一定差异，造成同仓混凝土温度差异；(3)个别温度计测值波动较大，与其它温度计差别明显。

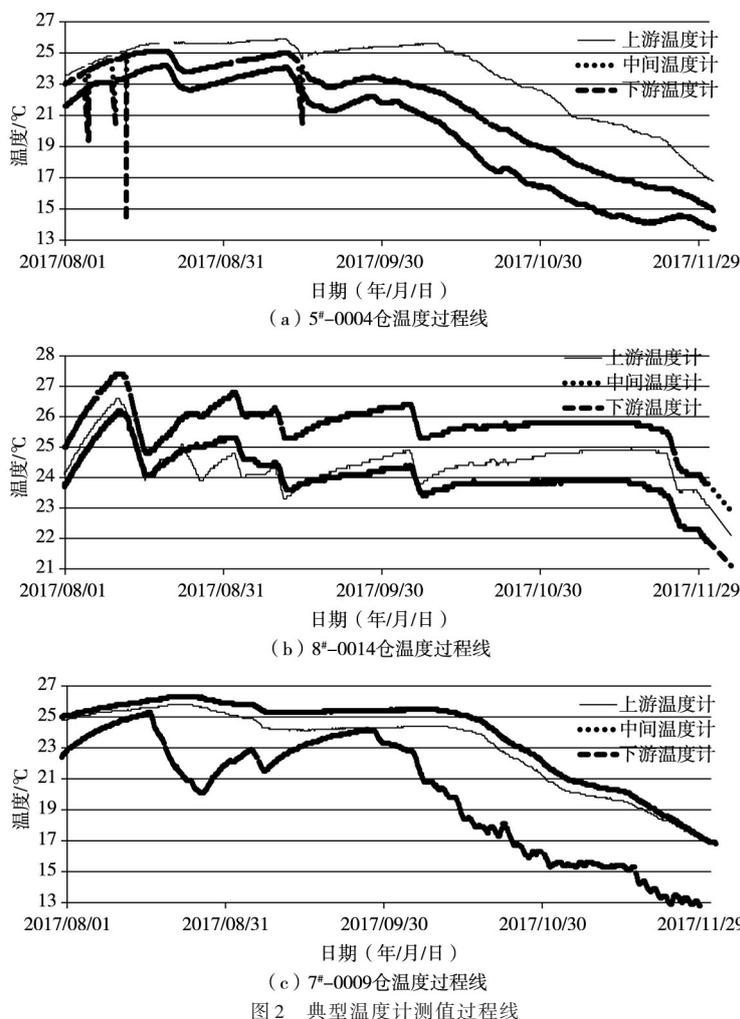


图2 典型温度计测值过程线

基于以上监测温度分布和变化规律，结合冷却水管和温度计埋设情况，可知：(1)温度计埋设位置距冷却水管距离不一致会使得温度测值存在偏差。温度计均要求埋设于两层冷却水管中间位置，即垂直方向和平面方向均位于冷却水管中间位置，以该位置温度代表仓块该区域温度。但实际施工过程中，埋设位置存在偏差难以避免。在温度计距冷却水管较近时，温度测值会受到冷却通水过程影响，导致温度偏低且波动性较大，不能反映该区域混凝土温度，使得同仓温度出现较大差异。图3

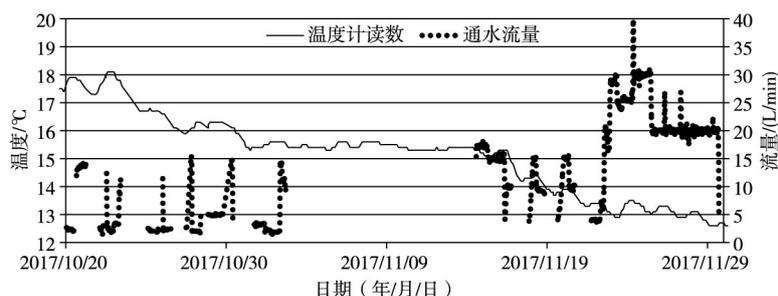


图3 通水流量与温度计读数过程曲线

为某仓通水流量曲线与温度过程曲线图，在通水阶段，温度曲线呈现锯齿状，存在 0.5 ℃ 左右的波幅，可以推测该温度计埋设位置过于靠近冷却水管，受通水影响明显。(2) 仓块上游侧较中下游宽，等长水管形成的弯形水管数量不同，各支管的水流阻力也会有所差别，一拖三的水管布置形式造成在上中下游侧流量不均匀。其次，冷却水管的挤压变形甚至破坏也会导致流量在各支管分配不均匀，从而造成同仓温差的出现。表 1 中各时间点上中下游温度计读数表明最低温度往往出现在中下游区域，上游区域未出现最低温度，这与冷却水管的进出水口均布置在下游有一定关系。(3) 在陡坡坝段基础约束区，浇筑仓侧面与基岩接触，温度计一般埋设于仓块中轴线位置，上下游温度计与基岩的距离不一致，基岩温度普遍偏高，在 22 ~ 24 ℃ 之间，温度计受到基础温度影响也会有所差别，如图 4 所示。

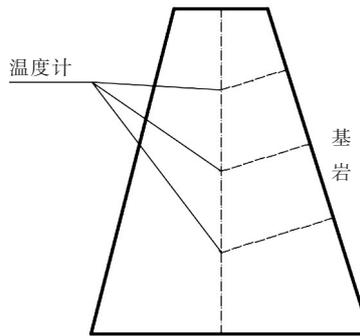


图 4 陡坡坝段浇筑仓温度计平面位置

4 温度差异对应力影响分析

4.1 计算模型和参数 以该拱坝基础强约束区浇筑仓为例，分析同仓温差对应力影响程度，计算混凝土和基岩主要热力学参数见表 2。仓块有限元模型见图 5，仓块中不同颜色部分表示浇筑仓上中下游区域，对不同区域调整通水流量以模拟温差对坝体的应力影响。基面底面三向固定，侧面轴向约束共计 62 060 个节点，56 032 个单元。

表 2 主要热力学参数

	导温系数/($\times 10^{-3} \text{m}^2/\text{h}$)	线膨胀系数/($10^{-6}/\text{℃}$)	28d 绝热温升/ ℃	泊松比	密度/(kg/m^3)	弹性模量/GPa
混凝土	3.067	7.5	20.2	0.17	2.4	47.4
基岩	3.2	7.0		0.20	2.68	28

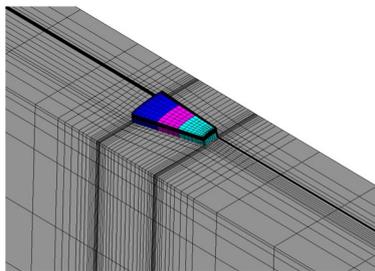


图 5 仿真分析模型

4.2 计算工况和软件 上下游温差的存在带来了附加拉应力，为了准确计算此温度荷载，本文考虑了上下游温差的不同分布形式以及温差大小，计算工况见表 3，仿真计算利用中国水利水电科学研究院独立自主开发的结构多场仿真与非线性软件 Saptis^[7-8]，SAPTIS 历经 30 年的“开发—应用—再开发—再应用”过程，是一款成熟的大型混凝土全过程、全要素仿真分析平台，已应用于锦屏^[9]、小湾^[10]、溪洛渡、大岗山等多个大型工程。

仿真分析过程中，混凝土浇筑温度为 16 ℃，初期冷却目标温度均控制为 24 ℃ 左右，中后期通水

冷却开启及结束时间均保持一致，通过控制仓块上中下游流量来调节不同的二冷结束温度，以满足各工况计算需求。

表3 计算工况 (单位: °C)

工况	计算内容	工况	计算内容
1	无温差工况 15/15/15	6	上中下游温度 15/18/13
2	上中下游温度 13/15/18	7	上中下游温度 18/15/13
3	上中下游温度 13/18/15	8	上中下游温度 13/13/18
4	上中下游温度 15/13/18	9	上中下游温度 13/18/18
5	上中下游温度 18/13/15		

4.3 不同温差形式对应力影响 温差为5 °C的6种温差形式下的应力情况见表4，各工况均在顺河向方向出现最大拉应力，图6~图12为顺河向应力最大时工况1~工况7顺河向应力等值线图。

表4 各工况最大拉应力

工况	温度最低区域	顺河向/MPa	横河向应力/MPa
工况1		1.174	0.619
工况2	上游	1.139	0.831
工况3	上游	1.078	0.899
工况4	中部	1.295	0.725
工况5	中部	1.290	0.747
工况6	下游	1.168	0.667
工况7	下游	1.237	0.643

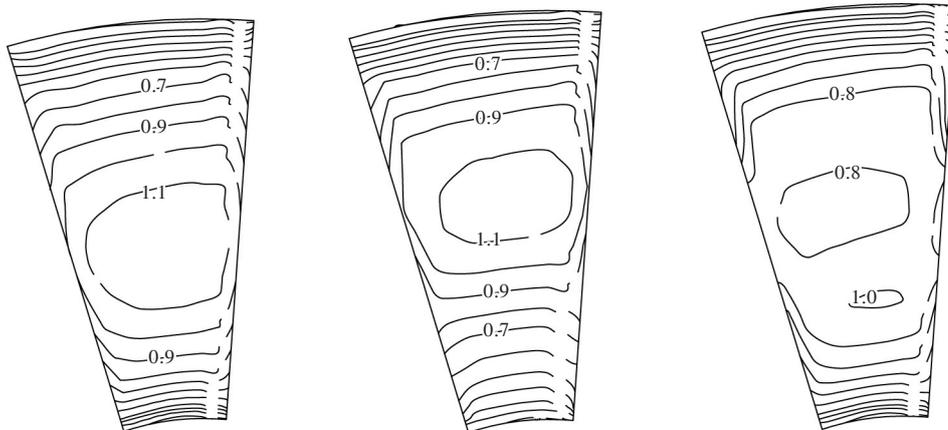


图6 工况1顺河向应力等值线图(MPa) 图7 工况2顺河向应力等值线图(MPa) 图8 工况3顺河向应力等值线图(MPa)

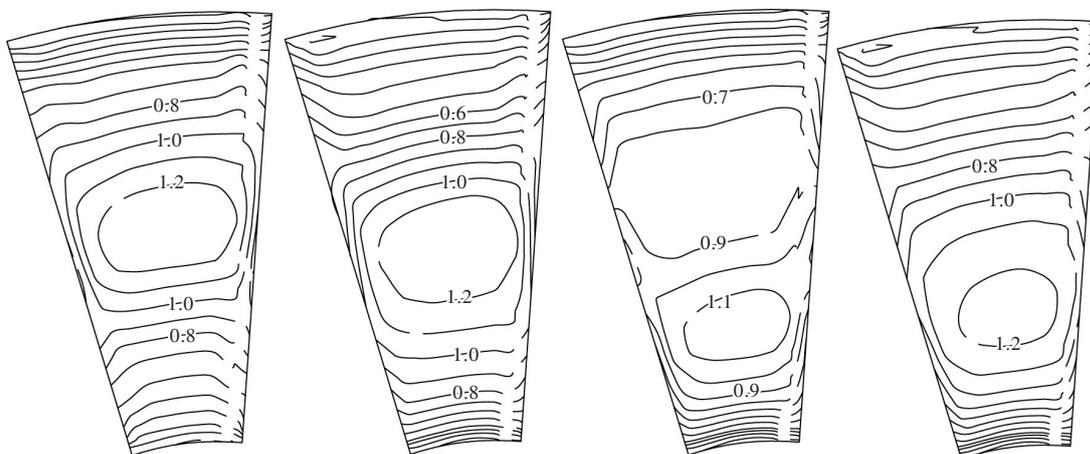


图9 工况4顺河向应力等值线图(MPa) 图10 工况5顺河向应力等值线图(MPa) 图11 工况6顺河向应力等值线图(MPa) 图12 工况7顺河向应力等值线图(MPa)

从表中可以看出：(1)顺河向应力，无温差工况下顺河向应力量值居于各工况中间水平，上下波幅0.1 MPa左右，中间区域温度最低产生的应力最大，下游平均拉应力次之，上游区域最小。工况4上中下游的温差形式15/13/18℃，拉应力最大，为1.295 MPa；工况3上中下游的温差形式13/18/15℃，拉应力最小，为1.078 MPa，两者相差20%。(2)横河向应力，温差存在工况下横河向应力均大于无温差工况横河向应力为0.619 MPa，浇筑仓上游温度最低的温差分布形式产生的横河向应力最大，其次是中部和下游，最大0.899 MPa，最小0.643 MPa，两者相差40%。由于浇筑仓在顺河向尺度大于横河向，无温差工况顺河向应力大于横河向，导致温差形式不同所产生的附加应力对横河向应力的影响程度大于顺河向。

以应力量值较大的顺河向应力为例，从各工况顺河向应力等值线图可以看到：(1)各种工况下顺河向应力分布的基本规律为仓块中间区域出现最大顺河向应力，向上下游两侧减小。这主要由于上下游面均为临空面，顺河向基本处于零应力状态，中间区域混凝土收缩变形收到上下游两侧混凝土的强约束作用。(2)无温差工况与其它温差存在工况的对比可以得出，顺河向应力分布主要表现为中部应力大，上下游两侧小的基本应力规律，但温差分布形式对应力分布也有一定程度的影响，主要体现在应力较大位置会向温度较低的区域有一定的偏移，使得上下游应力梯度发生改变。(3)在6种温差分布形式中，中间区域温度最低的温差分布形式产生的顺河向应力最大，这是因为中间温度最低时，混凝土变形收到的约束最强，使得中间部位顺河向应力最大。

4.4 不同温差大小对应力影响 温差大小对拉应力影响明显，不同的温差大小对同一区域意味着温度梯度的不同，温差越大，所形成的温度梯度也就越大，最终拉应力也就越大。下面分别仿真计算了仓块上中下游温度为13/18/18℃、13/15/18℃、13/13/18℃的3种工况，即中下游形成的温差分别为0℃、3℃、5℃。

图13~图15为3种工况下顺河向及横河向拉应力等值线图。由图可知：(1)各种工况下顺河向应力分布的基本规律为仓块中间区域出现最大顺河向应力，向上下游两侧减小。(2)温差大小对中下游区域顺河向应力分布规律也有一定影响，温差越大，最大顺河向应力越大，同时中部与上下游的应力梯度也就越大。这与整个中下游区域温度的降幅有关，温差越大意味着在下游温度不变的前提下，中部温度越低，中部温度降幅越大，所引起的拉应力也就越大，由于上下游面零应力状态的存在，中间部位顺河向应力的增大必将导致应力梯度的增大。(3)在不同温差大小情况下，横河向应力

表5 各工况最大拉应力

工况	中下游温差大小/℃	顺河向/MPa	横河向应力/MPa
工况2	3	1.139	0.831
工况8	5	1.345	0.819
工况9	0	0.948	0.899

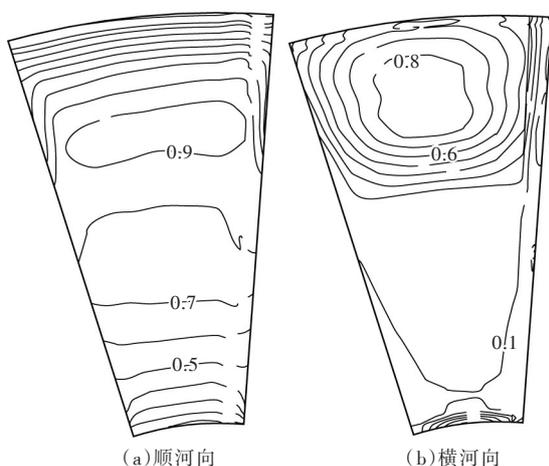


图13 中下部温差为0℃(MPa)

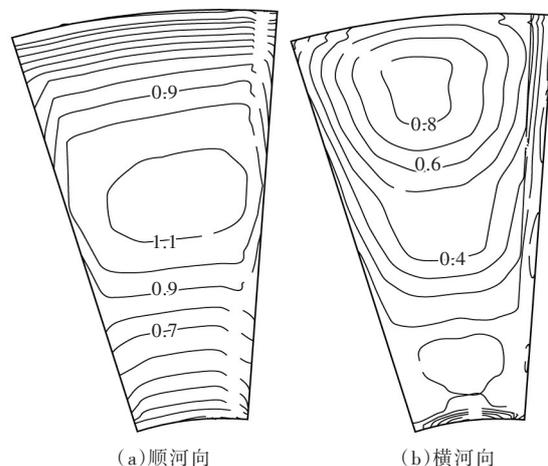


图14 中下部温差为3℃(MPa)

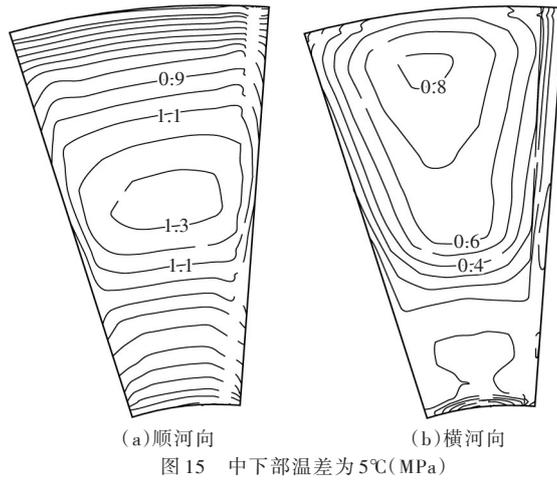


图 15 中下部温差为 5℃(MPa)

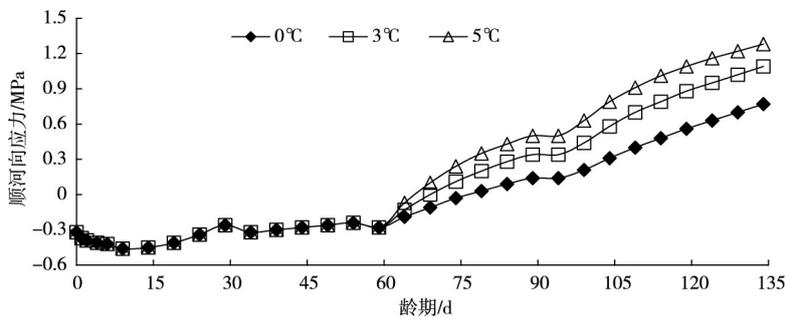


图 16 中点顺河向应力过程线

变化规律与顺河向类似，横河向最大应力分布于仓块上游部分中间位置，其原因在于仓块上游横河向方向尺度最大且温度最低。在中下部温差增大的情况下，温度最低的中间部位横河向应力逐步增大，由于整体仓块最大横河向应力位于上游区域，所以中下游温差的增大直接体现为从中下游应力近似均匀分布到应力梯度的逐步增大。

由表 5 可以看出，0℃、3℃、5℃所形成的最大顺河向拉应力分别为 0.948 MPa、1.139 MPa、1.345 MPa。取同一点即中轴线中点位置，应力分别为 0.77 MPa、1.09 MPa、1.28 MPa；温差每增大 2~3℃，顺河向应力增大 0.2~0.3 MPa 左右。图 16 为仓块中轴线中点 3 种工况下的过程线，拉应力的增长符合一般规律，温差越大，顺河向最大拉应力越大。从横河向应力来看，只考虑中下游横河向应力变化，中轴线中点位置应力分别为 0.17 MPa、0.49 MPa、0.68 MPa；温差每增大 2~3℃，横河向应力同样增大 0.2~0.3 MPa 左右。

5 结论

本文研究了拱坝浇筑过程中混凝土同仓温差问题，利用 SPATIS 软件对基础强约束区浇筑仓进行不同温差形式及温差大小等工况的仿真分析，本文得出如下结论：(1)同仓温差测值较大原因，一是温度计埋设距冷却水管距离不同带来的监测数值上的偏差，二是冷却水管长度不同、施工过程中挤压变形不同导致流速流量差异而引起的温度差异。因此，在实际工程中为避免同仓温差的出现，建议：对各支管流量进行准确控制，而不仅仅是只对主管流量进行控制；温度计埋设进行精准设计和施工，确保埋设位置一致。在一些仓块出现温差较大情况下，通过仿真分析可以得到比较准确的应力估计，采取“小流量、持续通水”的策略，能够避免不利情况的产生。(2)温差分布的形式对整体应力分布规律有一定影响，主要体现在应力最大值点会向温度较低的区域有一定的偏移，使得上下游应力梯度发生改变。(3)最大温差为 5℃的上中下游不同温差分布导致的顺河向拉应力最大和最小分别为 1.295、1.078 MPa，相差约 20%，横河向拉应力最大和最小分别为 0.899、0.643 MPa，相

差约40%，温差对横河向应力的影响大于顺河向应力。中部温度最低的15/13/18℃温差分布形式对顺河向最为不利，形成的最大顺河向拉应力为1.295 MPa；上游温度最低的13/18/15℃温差分布形式对横河向最为不利，形成的最大横河向应力为0.899 MPa。(4)相同温差形式下，在最小温度降幅一定时，温差增大2~3℃，顺河向及横河向应力增大约0.2~0.3 MPa，引起不同温差大小情况下应力梯度不同。

参 考 文 献：

- [1] 张国新,刘有志,刘毅,等.特高拱坝施工期裂缝成因分析与温控防裂措施讨论[J].水力发电学报,2010(5):45-51.
- [2] 张国新,刘毅,朱伯芳,等.高拱坝真实工作性态仿真的理论与方法[J].水力发电学报,2012(4):167-174.
- [3] 金峰,周宜红.分布式光纤测温系统在特高拱坝真实温度场监测中的应用[J].武汉大学学报(工学版),2015(4):451-458.
- [4] 刘小萍,万福磊,苏军安,等.分区分高程温控措施仿真计算研究[J].人民长江,2007,38(8):153-155.
- [5] 朱伯芳.小湾拱坝施工期裂缝成因的再探讨[J].水利水电技术,2015(4):1-5.
- [6] 张国新,陈培培,周秋景.特高拱坝真实温度荷载及对大坝工作性态的影响[J].水利学报,2014,45(2):127-134.
- [7] 张国新.SAPTIS:结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之一)[J].水利水电技术,2013(1):31-35.
- [8] 周秋景,张国新.SAPTIS:结构多场仿真与非线性分析软件开发及应用(之二)[J].水利水电技术,2013(9):39-43.
- [9] 刘毅,高阳秋,张国新,等.锦屏一级特高拱坝工作性态仿真与反演分析[J].水利水电技术,2017,48(1):46-51.
- [10] 张国新,刘有志,刘毅.特高拱坝温度控制与防裂研究进展[J].水利学报,2016,47(3):382-389.

Stress analysis of temperature difference in a cooling block of concrete arch dam

ZHAO Zehu¹, ZHOU Qiuqing¹, MU Rongfeng², YANG Ning², ZHANG Jiahao¹

(1. Department of Structures and Materials China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China;

2. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: According to the fact that temperature difference exists in a cooling block of concrete arch dam, this article analyzes the causes of temperature difference and uses the simulation analysis method to analyze the effect of temperature difference on stress. The results show three key points. (1) There are two reasons for the temperature difference. Firstly, the different distance between thermometers and cooling pipes causes the different value of thermometer, and the difference would be smaller in reality. Secondly, both the different length of cooling pipes and extrusion deformation of pipe which may result in the difference of flow also could lead to the temperature difference. (2) Various forms of temperature difference have some influence in stress distribution law. The maximum stress is on the middle of block, but the position would move a small distance towards lowest temperature area. Moreover, the minimum temperature occurs at the upstream or middle of the concrete block are most serious to the stress. (3) There are obvious stress differences increasing the temperature difference as the minimum temperature drop is same. Temperature difference increase 2℃ or 3℃ which means stress increase 0.2MPa or 0.3MPa in both transverse direction and stream direction. The security of concrete would have little change if the lowest temperature could be under the design permission. This result provides a reference for the control of thermal stress and crack of Arch Dam.

Keywords: arch dam; simulation analysis; temperature difference; thermal stress

(责任编辑:李福田)