DOI:10.20040/j.cnki.1000－7709.2026.20250568

基于中美温控算法的超高碾压混凝土重力坝施工期温度与应力场特性对比分析

吴志刚[1],胡继峰[1],何香玉[2,3],梁鸿宇[3],甘元楠[1],强 晟[3]

(1. 中国安能集团第二工程局有限公司,江西 南昌 330000; 2. 上海勘测设计研究院有限公司,上海 200080;3. 河海大学水利水电学院,江苏 南京 210098)

摘要:超高碾压混凝土重力坝在施工过程中展现出独特的温度与应力场分布特性。随着坝体高度、混凝土厚度、浇筑层数增加,热量积累与散逸过程变得复杂,导致温度与应力场呈显著非线性变化。为确保施工期的应力安全并验证中国温控规范的国际适用性,基于ABAQUS平台二次开发了美国规范下的温控计算程序,同时采用基于中国规范的温控仿真程序TCAS,对某300 m级碾压混凝土重力坝施工期温度场与应力场开展了仿真计算分析。结果表明,自然施工条件下夏季浇筑层存在较大的应力超标风险,而其他浇筑层的开裂风险较小,可以不采用通水冷却措施;在高温季节施工时,应延后模板拆除并对横缝采取绝热措施,以减缓坝体表层温度骤降并降低温度应力集中;中美规范计算结果吻合度高,验证了中国规范在大体积混凝土工程中的适用性,同时也为超高坝体的设计与施工提供了一定的技术参考。

关键词:超高碾压混凝土重力坝;中美规范对比;温控仿真;ABAQUS二次开发;温度场;应力场

中图分类号:TV698.1 **文献标志码**:A **文章编号**:1000-7709(2026)02-0156-06

Comparative Analysis of Temperature and Stress Field Characteristics During Construction of Ultra-High Roller-Compacted Concrete Gravity Dams Based on Chinese and U.S. Temperature Control Algorithms

WU Zhi-gang[1], HU Ji-feng[1], HE Xiang-yu[2,3], LIANG Hong-yu[3], GAN Yuan-nan[1], QIANG Sheng[3]

(1. China Anneng Group Second Engineering Bureau Co., Ltd., Nanchang 330000, China; 2. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Ltd., Shanghai 200080, China; 3. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Ultra-high roller-compacted concrete (RCC) gravity dams exhibit distinct characteristics in temperature and stress field distributions during the construction process. With increases in dam height, concrete thickness, and the number of placement layers, the processes of heat accumulation and dissipation become complex, leading to significantly nonlinear variations in the temperature and stress fields. To ensure stress safety during construction and to verify the international applicability of Chinese temperature control codes, a temperature control calculation program compliant with U.S. codes was secondarily developed on the ABAQUS platform. Meanwhile, the TCAS simulation program based on Chinese codes was employed to conduct a simulation analysis of the temperature and stress fields for a 300-m-high RCC gravity dam during its construction. The results showed that under natural construction conditions, the layers placed in summer carried a significant risk of exceeding stress limits, while the cracking risk for layers placed in other seasons was low, and internal water cooling may be omitted. For construction during high-temperature seasons, it was recommended to delay formwork removal and apply insulation measures to transverse joints, thereby mitigating the rapid temperature drop at the dam surface and reducing the concentration of thermal stress. The calculation results based on the Chinese and U.S. codes showed a high level of agreement, which verified the applicability of Chinese codes in international mass concrete projects. The findings also provide technical references for the design and construction of ultra-high dams.

Key words: ultra-high roller-compacted concrete gravity dam; comparison of Chinese and U.S. codes; temperature

收稿日期:2025-03-30,**修回日期**:2025-04-21,**接受日期**:2025-04-22

作者简介:吴志刚(1973-),男,硕士、正高级工程师,研究方向为智能施工和混凝土温控,E-mail:wuzhigang@china-an.cn

通讯作者:强晟(1977-),男,博士、教授、博导,研究方向为大体积混凝土防裂,E-mail:sqiang2118@hhu.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

control simulation; ABAQUS secondary development; temperature field; stress field

1　引言

随着“一带一路”倡议推进,碾压混凝土重力坝因施工快捷、造价低等优势在国际工程中得到广泛应用。然而,300 m 级超高坝体在施工期面临严峻的温度控制与应力管理挑战,热量积聚、梯度变化及不均匀变形易引发裂缝,影响结构安全与稳定性[1-2]。温度应力被认为是大体积混凝土裂缝的主要诱因,合理的温控设计对保障工程质量至关重要。美国、日本等国早期开展了相关研究,开发了 DOT-DICE 等程序,考虑热膨胀、弹性模量变化及徐变效应等因素,提升了仿真精度[3-5]。我国近年来在温控仿真技术上取得了显著进展,开发了 TCAS[6]、SAPTIS[7]、TCSAP、STEM 等程序,并提出了冷却水管建模、参数反演与三维温控优化等方法,为实际工程提供了技术支撑[8]。由于美国大体积混凝土温控规范[9]指定的计算分析软件是 ABAQUS,且要求如果采用其他软件或程序,需进行对比验证。故本文基于 ABAQUS 平台进行了二次开发,研发了符合美国规范[9]的计算程序,并与我国温控仿真分析软件 TCAS 进行对比分析,研究了 300 m 级超高坝体施工期混凝土温度与应力演化规律,旨在为超高坝体温控设计与结构安全提供理论支持与工程参考。

2　基于美国规范的温控仿真程序二次开发

2.1　混凝土施工期温度场和应力场有限元理论

2.1.1　大体积混凝土水化热预测方法

近年来,混凝土性能不断提升,施工工艺、水泥细度、模板形式及外加剂应用持续优化,尤以大体积结构最为显著。面对超高坝复杂工况,传统的最大允许温差法[10]、PCA 法[11]、ACI 207.2R 图解法[12]存在精度不足、计算成本高等问题,且 PCA 法未充分考虑粉煤灰、矿渣水泥对水化热的影响。美国规范因此推荐基于试验数据拟合放热函数[13],而等温传导量热法通过热流传感器精准测定水化热,更适用于温控优化。

中美规范在温控设计上差异明显,影响仿真参数设定。我国规范(SL 677-2014[14]、DL/T 5330-2015[15])要求初温≤25 ℃、升温≤2 ℃/d,ACI 标准则推荐初温≤21 ℃,对冷却与监测更为宽松。本文构建不同规范下的热源模型与边界条件进行对比仿真,探讨其对温控策略与结构安全性的影响。

2.1.2　徐变预测模型

在大体积混凝土结构中,温度荷载不仅引起弹性变形,还显著诱发徐变效应,准确预测其对 300 m 级碾压混凝土重力坝长期安全至关重要。徐变受应力状态、持载时间、龄期及温度变化的影响,尤其在超高坝体中,温度梯度大、应力集中明显,增加了预测难度。美国 GL2000 徐变模型因结构简洁、参数需求低,广泛应用于复杂大体积结构的高效徐变模拟[16]。计算公式为:

$$J(t,t_0)=1/E_{cmto}+\phi_{28}(t,t_0)/E_{cmt28} \tag{1}$$

其中

$$E_{cmt}=3\ 500+4\ 300\sqrt{\{\exp[(1-\sqrt{28/t})s/2]\}^2(1.1f_c'+5.0)} \tag{2}$$

式中,$J(t,t_0)$ 为柔度函数;E_{cmto} 为加载时刻弹性模量,MPa;$\phi_{28}(t,t_0)$ 为徐变系数;E_{cmt28} 为龄期 28 d 时刻弹性模量,MPa;E_{cmt} 为弹性模量;s 为与水泥类型有关的系数;f_c' 为混凝土特征抗压强度,MPa。

2.2　温控仿真程序的开发

针对温度场和应力场进行了计算机程序的开发与编制。具体的程序开发流程见图 1。

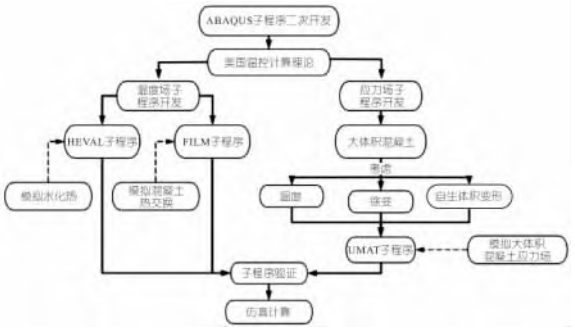

图 1　温控仿真程序二次开发

Fig. 1　Temperature control simulation program secondary development

在大体积混凝土施工中,胶凝材料的水化反应释放大量水化热,影响混凝土温度场的形成。为精确模拟温度场,采用 ABAQUS 中的 HETVAL 子程序来处理水化热问题。通过为材料属性添加 Heatgeneration 参数,该子程序能够显著提高温度场仿真精度。具体调用方法见图 2。

为了处理复杂边界条件(如拆模和外界气温

中国知网　https://www.cnki.net

```
IF(CMNAME(1:4).EQ.'MAT1')then
CALL HETVAL_MAT1(CMNAME,TEMP,TIME,DTIME,STATEV,FLUX,
1 PREDEF,DPRED)
ELSE IF(CMNAME(1:4).EQ.'MAT2')then
CALL HETVAL_MAT2(CMNAME,TEMP,TIME,DTIME,STATEV,FLUX,
1 PREDEF,DPRED)
ELSE IF(CMNAME(1:4).EQ.'MAT3')then
CALL HETVAL_MAT3(CMNAME,TEMP,TIME,DTIME,STATEV,FLUX,
1 PREDEF,DPRED)
ENDIF
```

图 2 多 HETVAL 程序的调用

Fig. 2 Multi-HETVAL program call

变化),使用 FILM 子程序模拟热传导系数及流体温度,并通过 SNAME 语句调整不同的热交换条件,提高了仿真模型的适应性和精度,示例见图 3。

```
if(SNAME.EQ.' ASSEMBLY_SURF-1')then
if(SNAME.EQ.' ASSEMBLY_SURF-2')then
if(SNAME.EQ.' ASSEMBLY_SURF-3')then
```

图 3 不同热交换形式的调整

Fig. 3 Adjustment of different heat exchange forms

USDFLD 子程序用于定义时间函数和单元积分点的特性,适应每层浇筑的龄期要求。HETVAL 与 UMAT 子程序配合,进行材料分层管理与龄期定义。UMAT 子程序专门用于模拟应力场,处理应力与热膨胀、自生体积变形等因素的相互作用。该子程序通过用户定制本构方程,进行应力应变平衡的迭代求解,特别适用于大体积混凝土的应力场模拟。UMAT 接口见图 4。

```
SUBROUTINE UMAT(STRESS,STATEV,DDSDDE,SSE,SPD,SCD,
1 RPL,DDSDDT,DRPLDE,DRPLDT,
2 STRAN,DSTRAN,TIME,DTIME,TEMP,DTEMP,PREDEF,DPRED,CMNAME,
3 NDI,NSHR,NTENS,NSTATV,PROPS,NPROPS,COORDS,DROT,PNEWDT,
4 CELENT,DFGRD0,DFGRD1,NOEL,NPT,LAYER,KSPT,JSTEP,KINC)
C
INCLUDE 'ABA_PARAM.INC'
C
CHARACTER*80 CMNAME
DIMENSION STRESS(NTENS),STATEV(NSTATV),
1 DDSDDE(NTENS,NTENS),DDSDDT(NTENS),DRPLDE(NTENS),
2 STRAN(NTENS),DSTRAN(NTENS),TIME(2),PREDEF(1),DPRED(1),
3 PROPS(NPROPS),COORDS(3),DROT(3,3),DFGRD0(3,3),DFGRD1(3,3),
4 JSTEP(4)
(user coding to define DDSDDE, STRESS, STATEV, SSE, SPD, SCD
and, if necessary, RPL, DDSDDT, DRPLDE, DRPLDT, PNEWDT)
RETURN
END
```

图 4 UMAT 子程序接口

Fig. 4 UMAT subprogram interface

3 有限元温控仿真

3.1 仿真模型的建立

以某 300 m 级碾压混凝土重力坝为例,该坝体坝顶高程 1 170 m,坝高 272 m,由左右岸非溢流坝段与河床溢流坝段组成,设有泄洪、排水和引水深孔,左右岸各布置 1 座地下厂房,安装 6 台 375 MW 水轮发电机组。选取左岸#16 坝段为研究对象(图 5(a))。主体结构采用 C20、RCC15、RCC20、RCC25、RCC30 五种混凝土(图 5(b)),热力学参数见表 1。基于中美规范分别利用国内仿真程序 TCAS 与 ABAQUS 二次开发程序,开展温度场与应力场有限元计算。通过结果对比验证程序可靠性,并给出施工期间关键热力响应特征。

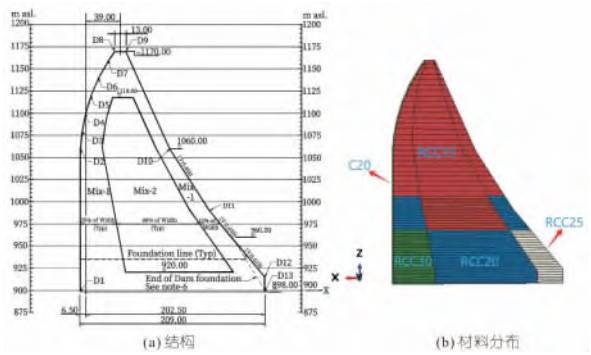

图 5 #16 坝段示意图

Fig. 5 Schematic diagram of structure of section 16 of dam

表 1 混凝土热力学参数

Tab. 1 Thermodynamic parameters of concrete

混凝土	导热系数	比热	线胀系数	密度	导温系数	泊松比
C20	8.467	0.96	7.35	2 450	0.003 6	0.167
RCC15	7.680	1.00	7.05	2 400	0.003 2	0.167
RCC20	7.873	0.99	7.16	2 410	0.003 3	0.167
RCC25	7.997	0.97	7.25	2 425	0.003 4	0.167
RCC30	8.113	0.95	7.30	2 440	0.003 5	0.167

注:导热系数、比热、线胀系数、密度、导温系数单位分别为 kJ/(m·h·℃)、kJ/(kg·℃)、10^{-6}/℃、kg/m^3、kJ/(m^2·h·℃)。

3.2 温度场数值模拟

3.2.1 特征点选取

在坝体中布设 6 个代表性特征点(图 6),用于分析施工期间的温度与应力变化。选取的特征点覆盖关键部位,便于识别热应力集中区域,为温控设计与施工管理提供参考依据。

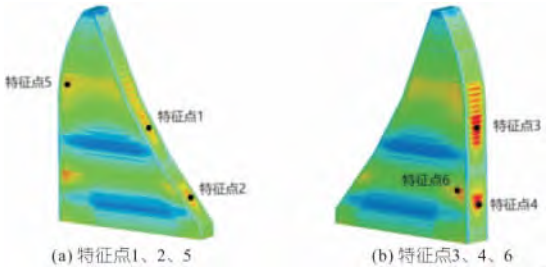

图 6 特征点示意图

Fig. 6 Schematic diagram of key points

3.2.2 温度场云图结果分析

基于中美规范开展温度场对比,选取 480、755、935 d 典型阶段展示相应云图,见图 7。由图 7 可看出,初期(95 m)上下游表面温度较低,13~19 层夏季施工及绝热处理使横缝局部升温,根据仿真节点数据提取,最高温度达 34.46 ℃(中)、35.52 ℃(美);中期(195.3 m)横缝区域持续为高

中国知网 https://www.cnki.net

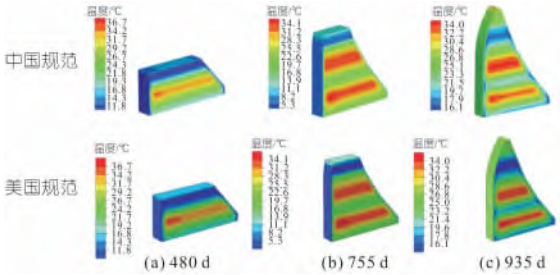

图 7　温度场云图

Fig. 7　Temperature field contour map

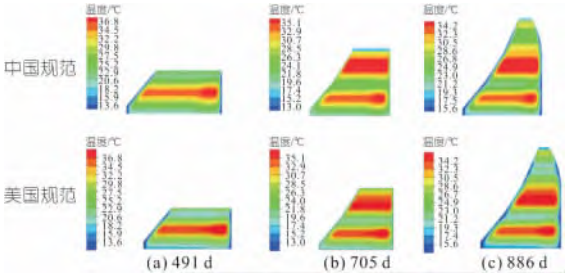

图 8　$Y=17.56$ m 剖面的温度场云图

Fig. 8　Temperature field contour map of $Y=17.56$ m section

温带,最高温度达 34.50 ℃(中)、34.52 ℃(美);后期(935 d)整体趋于环境温度,但坝体深部热量未完全释放。$Y=17.56$ m 剖面温度场见图 8。由图 8 可看出,初期 RCC30 区温度最高,达 38.24 ℃(中)、39.15 ℃(美);中后期 13～19、38～43 层交界处形成局部高温区。总体上,温度场随施工进度和季节呈现阶段性变化,高温区后期明显减弱。水化热与外界温度共同作用形成温度梯度,需在温控设计中予以关注。

3.2.3　特征点温度时程曲线分析

选取坝体上下游面、横缝区域及核心部位特征点,绘制温度时程曲线(图 9),分析不同规范下的温度变化规律。

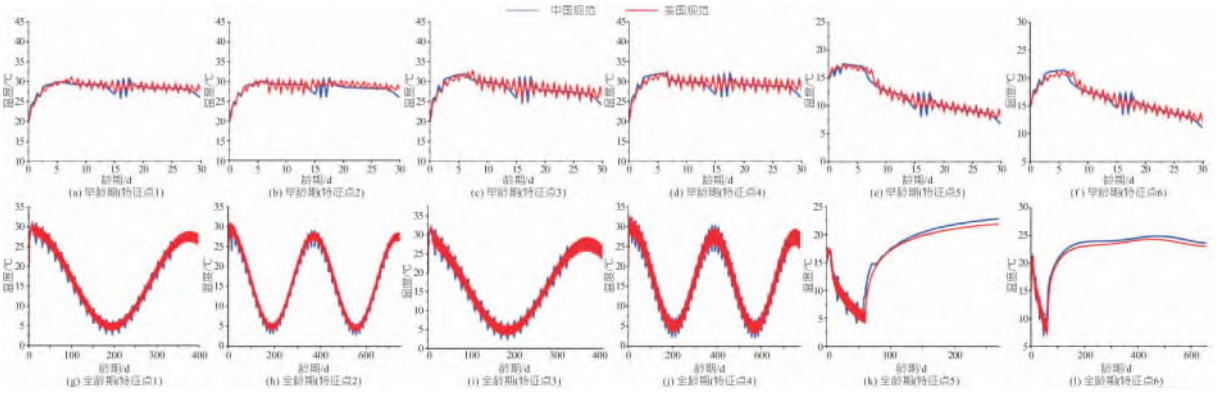

图 9　特征点温度时程曲线

Fig. 9　Temperature time history curves of key points

由图 9 可看出,拆模后前 7 d 温度波动较大,美国规范变化更显著,国内规范相对平稳但趋势一致;15 d 后,中国规范计算温度更受上层混凝土影响。下游特征点 1、2 最高温度分别为 30.04、29.84 ℃(中)与 29.85、29.66 ℃(美),上游特征点 3、4 分别为 32.03、32.19 ℃(中)与 31.86、31.92 ℃(美),差异均小于 0.3 ℃,结果一致性良好。温度演化除受环境影响外,更受水化热累积控制,横缝区域梯度显著,早期温升快,拆模后迅速降温,7 d 后趋于一致。60 d 时横缝绝热处理使特征点 5 温度回升并趋稳。特征点 5、6 最高温度分别为 22.85、24.91 ℃(中)与 22.11、24.33 ℃(美),差异不超 0.74 ℃,进一步验证中美规范在横缝温度预测方面的一致性。

3.2.4　特征点最高温差差异性对比

对比中美规范坝体特征点的最高温度,见图 10。由图 10 可看出,在特征点 1～4(上下游面),中国规范计算结果分别高出 0.53%～0.84%,差异较小,说明中美规范在散热与边界处理方面较

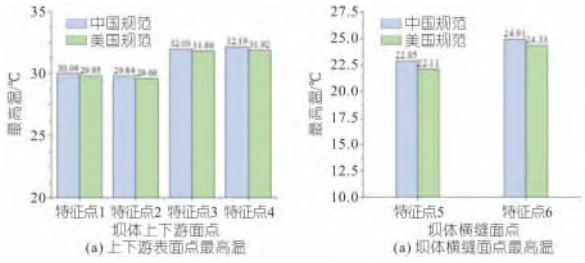

图 10　坝体特征点最高温对比

Fig. 10　Comparison of the maximum temperature at key points of dam

一致。特征点 5、6(横缝面)差异达 3.35%、2.38%,显示中国规范在此区域预测更为保守。总体来看,横缝及核心区域差异显著,反映中美规范在热传导假设与控制策略上存在不同,对高坝温控与应力防控具有指导意义。

3.3　应力场数值模拟

3.3.1　应力场云图结果分析

通过有限元模拟,获得施工过程中的应力场分布见图 11。根据仿真节点数据提取,398 d 时上游面(77 m)拉应力已达 2.33、2.56 MPa,超过

中国知网　https://www.cnki.net

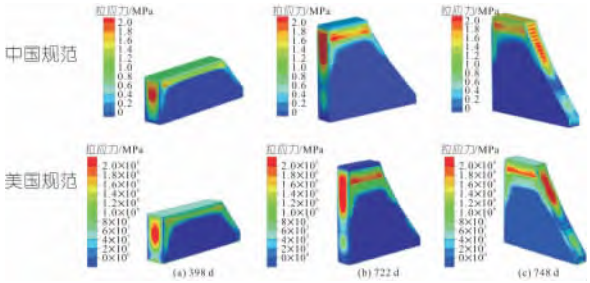

图 11 应力场云图

Fig. 11 Stress field contour map

安全阈值，存在裂缝风险；浇筑至 182、188.6 m 后，拉应力进一步增大，下游面峰值达2.87 MPa（图 11(c)），已超抗拉极限。总体而言，拉应力随浇筑高度与龄期增长而增强，夏季施工区及新旧混凝土交界处尤为显著，易产生拉应力超标。

3.3.2 特征点应力时程曲线分析

通过对多个特征点的应力变化分析，绘制了应力时程曲线（图 12），揭示了不同位置的应力分布特性。由图 12 可看出，早龄期中国规范计算的应力普遍高于美国规范，龄期 30 d 后美国规范的应力计算结果略高。中美规范分别计算得到特征点 1、2 的最大拉应力差异较小。在上游面（特征点 3、4），拆模后应力上升，30 d 后美国规范较高。

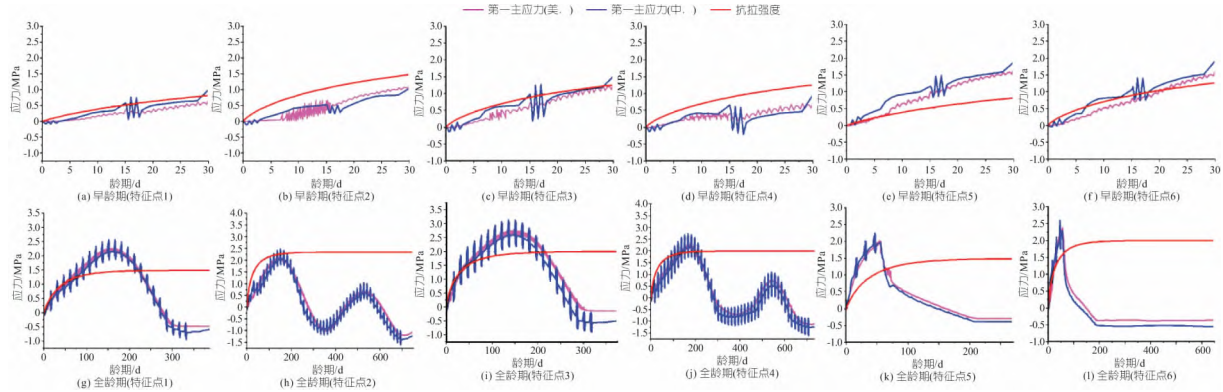

图 12 特征点应力时程曲线

Fig. 12 Stress time history curves of key points

在横缝面（特征点 5、6），早龄期中国规范应力略高，60 d 后的一段时间内美国规范应力上升较快，但中美规范对应力变化的计算趋势一致，揭示了不同位置的应力演变规律，为后续施工优化、温控设计及结构安全评估提供了宝贵数据。

3.3.3 特征点最大拉应力差异性对比

通过计算大坝上下游面和横缝处的特征点最大拉应力，分析了中美规范的差异，结果见图 13。

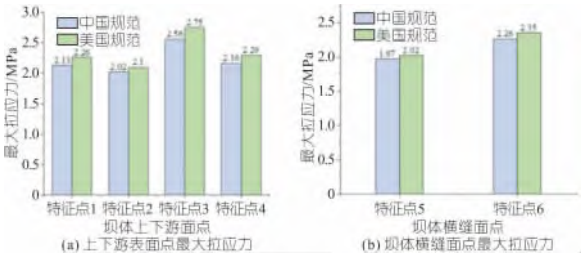

图 13 坝体特征点最大拉应力对比

Fig. 13 Comparison of the maximum tensile stress at key points of dam

由图 13 可看出，美国规范计算的上下游面特征点 1～4 最大拉应力分别比中国规范高出 6.10%、3.96%、7.42%、6.02%，平均高 6.37%，表明美国规范在该区域预测拉应力略高，主要因超高坝竖向应力大且外部温差效应显著，导致应力集中。而横缝处特征点 5、6 差异较小，分别为 2.54%、3.98%，平均 3.26%，反映中美规范在横缝绝热处理与热应力模型处理较为一致。总体来看，上下游面与横缝存在一定差异，但坝体内部误差较小。规范间对外部边界与内应力耦合处理的不同，可能在 300 m 级超高坝中放大温度与应力响应，影响结构安全。模拟表明，部分时段上下游面与横缝拉应力超出混凝土抗拉强度，存在裂缝风险，需通过优化表层保温、调整浇筑节奏与冷却管布置，降低风险，保障大坝长期稳定性。

4 结论

a. 坝体高度对温度与应力分布有一定的影响，施工期应加强温控与保温措施以降低热应力风险。

b. 碾压混凝土重力坝的温控难度总体较低，夏季施工的浇筑块必须采用一定的温控措施，其他季节施工的浇筑块在无温控措施条件下，开裂风险不大。

c. 中美规范在温度与应力计算结果上略有差异，整体规律和发展趋势表现出较高的一致性，证明了基于中国规范的仿真计算程序可以用于大体积混凝土的温控仿真分析。

参考文献：

[1] 朱伯芳. 混凝土坝施工期温度场计算[J]. 水利水

中国知网 https://www.cnki.net

电技术，2010，41(9)：36-41，56.(ZHU B F. Computation of temperature field in the construction period of concrete dams[J]. Water resources and hydropower engineering，2010，41(9)：36-41，56.(in Chinese))

[2] 强晟，朱岳明，吴世勇，等. 锦屏一级高拱坝温度场和应力场仿真分析[J]. 水电能源科学，2007，25(2)：50-52.(QIANG S,ZHU Y M,WU S Y,et al. Temperature field and stress field simulation analysis for Jinping-1 high arch dam[J]. Water resources and power,2007,25(2):50-52.(in Chinese))

[3] WILSON E L. Determination of temperatures within mass concrete structures[M]. California:Structural Engineering Laboratory，University of California，1968.

[4] POLIVKA R M. Finite element analysis of nonlinear heat transfer problems[M]. Berkeley:University of California，1976.

[5] TATRO S B，SCHRADER E K. Thermal considerations for roller-compacted concrete[C]//Journal of the American Concrete Institute(ACI). 1985，82(2)：119-128.

[6] 河海大学. 混凝土结构施工温控仿真辅助分析软件:2011SR086975[Z]. 2011-04-12.(Hohai University. Thermal control simulation and auxiliary analysis software for concrete structure construction:2011SR086975[Z]. April 12，2011.(in Chinese))

[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，2013，44(1)：31-35，44.(ZHANG G X. Development and application of SAPTIS-a software of multi-field simulation and nonlinear analysis of complex structures (Part I)[J]. Water resources and hydropower engineering，2013，44(1)：31-35，44.(in Chinese))

[8] HA J H，JUNG Y S，CHO Y G. Thermal crack control in mass concrete structure using an automated curing system[J]. Automation in construction，2014，45：16-24.

[9] 王宁. 考虑性态变化的早期混凝土多场耦合分析及其应用[D]. 天津：天津大学，2014.(WANG N. Multi-field coupling analysis of early-age concrete and its application considering changing of behavior[D]. Tianjin：Tianjin University，2014.(in Chinese))

[10] RIDING K A，POOLE J L，SCHINDLER A K，et al. Evaluation of temperature prediction methods for mass concrete members[J]. ACI materials journal，2006，103(5)：357-365.

[11] KOSMATKA S H，KERKHOFF B，PANARESE W C. Design and control of concrete mixtures [M]. Skokie，IL：Portland Cement Association，2002.

[12] ACI Committee 207. 207.2R-07：Report on thermal and volume change effects on cracking of mass concrete [R]. Farmington Hills，MI：American Concrete Institute，2007.

[13] FERRARO C C. Determination of test methods for the prediction of the behavior of mass concrete [D]. Gainesville：University of Florida，2009.

[14] 中华人民共和国水利部. 水工混凝土施工规范：SL 677-2014[S]. 北京：中国水利水电出版社，2015.(Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. Specifications for hydraulic concrete construction：SL 677-2014[S]. Beijing：China Water & Power Press，2015.(in Chinese))

[15] 国家能源局. 水工混凝土配合比设计规程：DL/T 5330-2015[S]. 北京：中国电力出版社，2015.(National Energy Bureau of the People's Republic of China. Code for mix design of hydraulic concrete：DL/T 5330-2015[S]. Beijing：China Electric Power Press，2015.(in Chinese))

[16] ZHANG R. Evaluation of current concrete creep prediction models[D]. Toledo:University of Toledo,2016.

(上接第 210 页)

[9] 国家市场监督管理总局，国家标准化管理委员会. 水轮发电机基本技术要求：GB/T 7894-2023[S]. 北京：中国标准出版社，2023.(State Administration for Market Regulation，Standardization Administration of the People's Republic of China. Fundamental technical requirements for hydrogenerators：GB/T 7894-2023[S]. Beijing：Standards Press of China，2023.(in Chinese))

[10] 杨新村，王绍禹. 应用威布尔分布函数推算发电机绕组的击穿电压[J]. 电力技术，1983,16(12)：1-5.(YANG X C，WANG S Y. Calculation of breakdown voltage of generator winding by Weibull distribution function[J]. Electric power，1983，16(12)：1-5.(in Chinese))

[11] 于晓红，张来斌，王朝晖，等. 基于新的威布尔分布参数估计法的设备寿命可靠性分析[J]. 机械强度，2007,29(6)：932-936.(YU X H，ZHANG L B，WANG Z H，et al. Reliability life analysis of the equipment based on new weibull distribution parameter estimation method[J]. Journal of mechanical strength，2007，29(6)：932-936.(in Chinese))

[12] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 威布尔分析：GB/T 34987-2017[S]. 北京：中国标准出版社，2017.(State Administration for Market Regulation，Standardization Administration of the People's Republic of China. Weibull analysis：GB/T 34987-2017[S]. Beijing：Standards Press of China，2017.(in Chinese))

[13] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 电气绝缘击穿数据统计分析导则：GB/T 29310-2012[S]. 北京：中国标准出版社，2013.(State Administration for Market Regulation,Standardization Administration of the People's Republic of China. Guide for the statistical analysis of electrical insulation breakdown data：GB/T 29310-2012[S]. Beijing：Standards Press of China，2013.(in Chinese))

中国知网　https://www.cnki.net