

挡潮闸闸墩高性能大体积混凝土温度效应与控制

杨中¹, 吴晓荣¹, 刘成²

(1. 中水淮河规划设计研究有限公司, 安徽 蚌埠 233001; 2. 南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037)

摘要:为了解决某挡潮闸枢纽工程中高性能大体积混凝土结构浇筑时的温度控制问题,避免因混凝土干缩、自体积变形、外部约束和温度效应等因素引起混凝土开裂,取闸室底板和中墩进行三维有限元建模,对闸墩采取不同的温控措施,进行闸墩温度场和温度应力场的仿真分析,研究闸墩冷却水管布置方案的温控效果并提出科学合理的温度控制措施,为现场科学施工提供理论指导。仿真结果表明:通水冷却效果良好,闸墩均未出现裂缝;在混凝土浇筑初期采取降低入仓温度和通水冷却等降温措施来减小由于混凝土水化热引起的最大温升,可以有效减小混凝土温降阶段的降温幅度;控制最大温升、内外温差及温降速率是大体积混凝土闸墩温控防裂的关键。

关键词:高性能混凝土;挡潮闸;闸墩;温度控制;防裂措施;散热边界

中图分类号:TV431

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2012)05-0038-05

Temperature effect and control analysis of high-performance mass concrete for pier of tidal gate//YANG Zhong¹, WU Xiaorong¹, LIU Cheng² (1. China Water Huaihe Planning Design and Research Co., Ltd, Bengbu 233001, China; 2. College of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: To avoid concrete cracking due to concrete shrinkage, autogenous deformation, external constraints, and temperature effects, it is necessary to solve the temperature control problem of high-performance mass concrete structures during the pouring process. With different temperature control measures for piers, simulation analysis of the temperature field and temperature stress field was conducted. Then, the temperature control effect of the cooling water pipe layout scheme was analyzed, and reasonable temperature control measures are proposed to guide field construction. The simulation analysis results show that there are no cracks on the pier because of good water cooling effects; pipe cooling and decrease of the placing temperature can be used to decrease the maximum temperature rise caused by hydration heat of concrete during the initial concrete pouring, and to decrease the range of the temperature decline; and control of the maximum temperature rise, temperature difference, and freezing rates is critical for crack control of the mass concrete pier.

Key words: high performance concrete; tidal gate; pier; temperature control; crack control measures; boundary conditions of scattering heat

挡潮闸主要由底板和闸墩组成,为倒T形墙-板式水工混凝土结构,顶部自由变形,底部受底板约束变形,常形成贯穿性竖直裂缝,增大结构的渗透变形,影响工程稳定。

高性能混凝土具有高耐久性的特点,包括高体积稳定性(收缩和徐变小)、低渗透性和高工作度。高性能混凝土的徐变总量(基本徐变与干燥徐变之和)显著低于普通混凝土,其中干燥徐变减少量占绝大多数。高性能混凝土由于采用高效减水剂,水灰比和单位用水量很低,水化反应较早终止,水化热相应较低。但高性能混凝土采用较低的水胶比,且早期强度偏低,早期干缩变形及自收缩变形均相对

较大,因此产生早期裂缝的风险随之增加。

国内学者对大体积混凝土温度控制做了很多研究。朱伯芳^[1]把冷却水管看成负热源,建立了大体积混凝土的等效热传导方程,在平均意义上考虑水管冷却的效果,使有限元模型仅需布置比较稀疏的网格来考虑水管冷却的效果。曹为民等^[2]应用非稳定温度场和徐变应力场仿真程序对裂缝产生的原因进行了探讨,对薄壁水闸闸墩结构采取相应的温控措施,一定程度上避免了裂缝的出现。朱伯芳^[3]对混凝土坝温控防裂技术的发展进行了回顾与展望,并对抗裂安全系数的取值、材料抗裂性能的改进、基础温差和上、下层温差的控制、表面保温和养

护等问题进行了分析,指出安全系数偏低和对表面保护认识上的片面性是导致无坝不裂的重要原因。王建等^[4]对通用有限元分析程序 ABAQUS 进行了二次开发,建立了弹性徐变本构模型,提出了一种考虑表面散热对水管冷却影响的等效算法,实现了大体积混凝土温度场和徐变应力的计算。傅少君等^[5]以小湾超高拱坝为背景,系统地研究了与温控防裂有关的核心技术问题,建立了拱坝温控的动态跟踪仿真反馈分析系统及信息化动态设计方法,提出了抗裂安全度取值建议和合理的温控设计方案,实现了拱坝施工期全过程仿真反馈分析及温控措施的动态优化设计。崔景川等^[6]对某坞口坞墩混凝土施工期温度场进行原型观测,采用三维有限元分析软件 ANSYS 对坞墩混凝土施工期温度场进行了仿真分析,并与实测结果进行了对比,二者基本吻合,得出的大体积混凝土结构在施工期温度场的特点及变化规律适用于分层施工温控方案。

1 闸墩温控分析有限元模型及材料参数

某挡潮闸枢纽工程由挡潮闸、上下游引河、排水闸及排水通道组成,属于 I 等大(1)型水闸,共 33 孔,每孔净宽 15.00 m,总宽度为 576.92 m。闸室为两孔一联开敞式大体积混凝土结构,采用沉井基础,闸墩分缝,中墩厚 2.20 m,缝墩及边墩厚 1.45 m,墩长 19.00 m,墩高 9.00 m,闸墩底部处于强约束区。工程临近黄海,闸址周围水土环境复杂,建筑物所用混凝土受海水侵蚀,为了提高工程的耐久性,闸墩和底板均采用大掺量磨细矿渣 C30 水工高性能混凝土,其配合比为:胶凝材料 400 kg/m³,水泥 160 kg、磨细矿渣 224 kg、石膏 16 kg。

1.1 有限元模型

a. 模型建立。本计算分析选取闸室两孔一联大底板及中墩进行三维有限元建模,以闸室横河向为 x 向,以外河侧指向内河侧为 y 正向,以竖直向上为 z 正向。模型共剖分单元 203 634 个,结点 81 170 个,如图 1 所示。

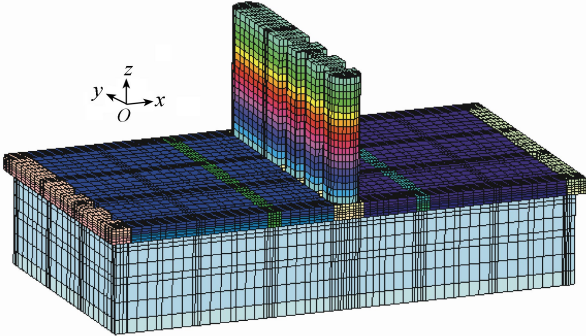


图 1 闸室底板及中墩三维有限元模型

b. 边界条件。在进行闸墩温度场分析时,闸底板及沉井为恒温边界条件。在浇筑过程中,闸墩按 50 cm 一层进行分层浇筑,闸墩左右侧按有木模板的散热边界处理;闸墩两圆头为钢模板,考虑到钢模板热扩散率大,故按自由散热边界处理;顶面为自由散热边界。在浇筑结束后,闸墩左右侧按覆盖木模板和草帘子的散热边界处理;闸墩两圆头外侧由于加了保温板,故按覆盖保温板的散热边界处理;顶面为覆盖土工布、草帘子及保温板的散热边界。取沉井基础底面为固定约束,由于沉井埋入地下,故沉井基础四周侧边按施加法向约束考虑,底板四周侧边为自由边界。

c. 荷载条件。在计算分析中仅考虑结构承受温度荷载引起的变形和应力分布情况。

1.2 材料参数

根据现场施工所采用的保温措施,结合 SL 191—2008《水工混凝土结构设计规范》附录 G 中建议的不同保温材料的热学特性指标,计算得到不同覆盖情况下混凝土表面传热系数,如表 1 所示,各种材料的热学参数如表 2 所示,模型温度应力场分析力学材料参数如表 3 所示。

表 1 不同覆盖情况下混凝土表面传热系数

覆盖情况	覆盖材料	厚度/m	覆盖物热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	传热系数/(W·m ⁻² ·K ⁻¹)	
				最外层	等效
未覆盖				22.240	
表面加覆盖层	土工布	0.002	0.047		
	草帘子	0.020	0.139		1.275
	保温板	0.020	0.036	22.240	
侧面加木模板	木模板	0.020	0.234	22.240	7.656
侧面加覆盖层	木模板	0.020	0.234		
	保温板	0.020	0.036	22.240	1.462

表 2 各种材料热学参数

材 料	热扩散率/(10 ⁻⁷ m ² ·s ⁻¹)	热导率/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)
混凝土	12.50	2.95
土 体	7.00	
空 气	161.00	
水 体	1.50	

表 3 温度应力场分析力学材料参数

材 料	密度/(kg·m ⁻³)	弹性模量/GPa	泊松比	线膨胀系数/10 ⁻⁷
沉井盖板				
混凝土(C30)	2400	30.00	0.167	100.00
土 体	1950	0.01	0.350	1.00
高性能混凝土	2450	444.00	0.167	97.17

2 闸墩温控措施分析

为了解闸墩在不同龄期和不同温度变化时结构

的应力分布情况,升高或降低闸墩整体、表面和中部的温差值,分析闸墩的应力变化情况。

表 4 给出了闸墩(中墩)整体均匀温变以及内外不均匀温变时拉应力的极限值,并对均匀温变和不均匀温变情况进行了组合。可以看出在温升阶段若闸墩整体均匀温升,并不会产生太大的拉应力,若闸墩内外存在不均匀温升时就会产生较大的拉应力,拉应力随混凝土弹性模量的提高而增大,在温升阶段应控制混凝土内外温差不大于 10℃。在混凝土水化热结束后的温降阶段,混凝土弹性模量相对于前期已经较高,即使均匀温降,由于受底板混凝土的约束,也会产生较大的拉应力,若再加上内外不均匀温降,则拉应力就会更大。因此,为减小混凝土温降阶段的降温幅度,在混凝土浇筑初期采取降低入仓温度、通水冷却等降温措施来减小由于混凝土水化热引起的最大温升,可以有效减小混凝土温降阶段的降温幅度。

表 4 闸墩(中墩)不同温控措施应力分析计算

组合	龄期/d	温差/℃			最大拉应力/MPa	
		整体	中部	边界	x 向	y 向
①	0.5	25			0.373	0.325
②	0.5		30	25	0.582	0.736
③	1.0	30			0.880	1.274
④	1.0		30	25	1.189	1.968
⑤	7.0	-10			2.534	2.777
⑥	7.0		-10	-15	3.726	4.370
②+⑤	0.5+		30+	25+	0.437	0.289
	7.0	(-10)	(-10)	(-10)		
②+⑥	0.5+		30+	25+	1.728	1.730
	7.0	(-10)	(-15)	(-15)		
④+⑤	1.0+		30+	25+	1.041	1.269
	7.0	(-10)	(-10)	(-10)		
④+⑥	1.0+		30+	25+	2.285	2.353
	7.0	(-10)	(-15)	(-15)		

挡潮闸闸墩在夏季高温季节施工,混凝土的入仓温度较高,容易产生较大的水化热温升,温控措施显得尤为重要。图 2 反映了组合⑥闸墩顺河向应力分布情况,图中拉应力为正,压应力为负。可以看出,当闸墩产生较大的不均匀温降时在闸墩底部的强约束区容易产生较大的拉应力,易导致温降阶段

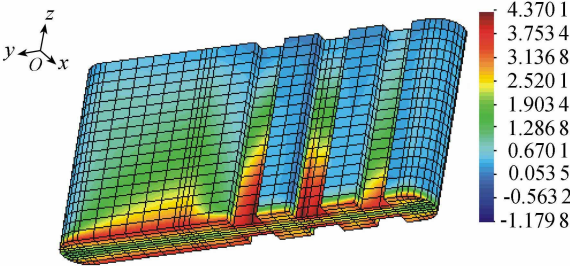


图 2 组合⑥ 闸墩顺河向应力分布(单位:MPa)

的温度裂缝产生。

根据以往闸墩温控措施的经验,闸墩底部区域受底板约束比较大,属于强约束区,在混凝土温度变化时容易产生温度裂缝。因此,一般在闸墩下部2/3的区域内布置冷却水管来降低由于水泥水化热引起的最高温升。

3 闸墩温度场及应力场仿真分析

在进行闸墩温度场及温度应力场仿真分析中,沉井基础和闸底板作为 16.5℃ 恒温体,闸墩按 50 cm 一层进行浇筑,混凝土入仓温度为 20℃,通 15℃ 地下水进行冷却。为了比较水管的冷却效果,采用等效水管算法,进行两种工况的仿真分析:工况 1 是在闸墩下部 2/3 区域内考虑通水冷却效果,厚度方向布置了两排冷却水管,按高程分上、下两套分别控制;工况 2 是不考虑通水冷却效果。

由于混凝土浇筑初期水化热及弹性模量变化速度较快,在计算分析初期采用较小的时间步长,之后随着混凝土水化热减弱及弹性模量变化速率减慢而增大时间步长。如图 3 所示,取闸墩特征部位的控制点(A,B,C)分析闸墩的温度及应力随时间变化的过程。图 4 为浇筑 48 h 后闸墩中间剖面温度分布,可以看出,由于在闸墩下部 2/3 区域内考虑通水冷却,这一区域的温度相对较低;而没有考虑通水冷却的上部区域则温度较高。

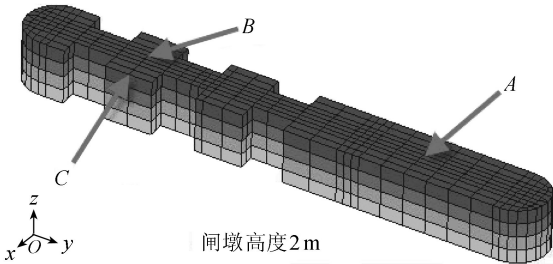


图 3 闸墩特征部位控制点位置

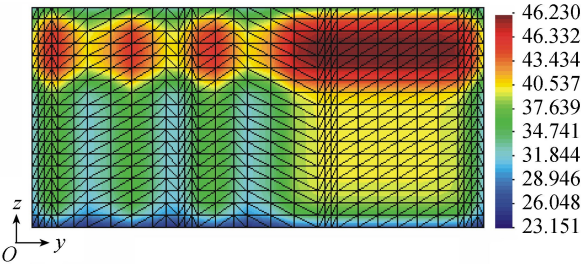


图 4 浇筑 48 h 后闸墩中间剖面温度分布(单位:℃)

图 5 为通水冷却措施对 A 点和 B 点的温度影响,可以看出通水冷却的效果非常明显,通水后可使混凝土内部温度降低大约 8.7℃。

图 6 为浇筑 48 h 后闸墩中间剖面的应力分布情况,图中拉应力为正,压应力为负。可以看出,由于

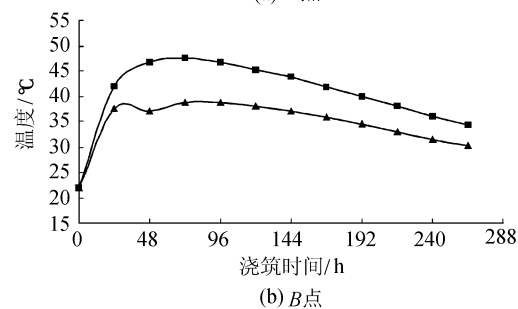
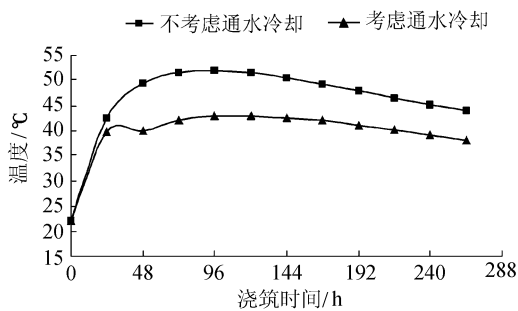


图5 通水冷却措施对A点和B点的影响

在闸墩下部采取了通水冷却措施,闸墩底部的拉应力均不大,而在闸墩顶部有相对较大的拉应力,这主要是由于顶部作为散热边界,受外界环境影响较大。因此,需要做好顶部的保温措施,以减小顶面受外界环境影响的程度。

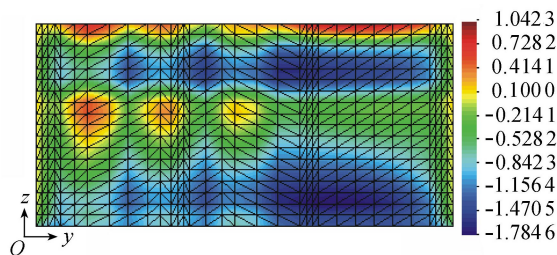


图6 浇筑48 h后闸墩中间剖面应力分布(单位:MPa)

4 闸墩现场施工监测分析

4.1 监测布置

为全面了解闸墩混凝土在施工及冷却保温过程中温度变化特性,选择几个闸墩进行试浇筑,试浇闸墩里埋设了较多的监测仪器,以了解温度和应力分布情况,寻找施工过程中的薄弱环节,用以改进和完善混凝土温控措施,有效防止裂缝的产生,为后续闸墩施工提供依据。

闸墩底部处于强约束区,在距底板2 m处布置了较多温度计及应变计,仪器埋设综合考虑了下游门槽和闸墩圆头等结构,以16号中墩为例,从与底板接触处算起,在2 m、5 m和7 m处共布置了8支应变计、6支温度计和1支无应力计。在混凝土入仓后的16 h内每2 h测一次,16 h之后每4~8 h测一次,通过现场监测捕捉温度变化情况以实时指导施

工,采取对应的温控措施。

4.2 监测资料分析

闸墩的入仓温度在18~25℃之间,受水化热的作用,第一阶段为混凝土温升阶段,在随后2 d内混凝土内部温度上升到最大值。第二阶段为混凝土温降阶段,温度开始下降,最终达到与外部气温一致。

4.2.1 闸墩温度时程变化

混凝土在浇筑一两天后温度达到最高,随着水化热作用的减弱以及通水冷却和自身散热等作用,温度逐渐开始回落,最高温升在25~30℃之间。图7为16号中墩T2测点的温度实测值与计算值的时程变化过程线,可以看出,闸墩温度计算值与实测值总体吻合较好。

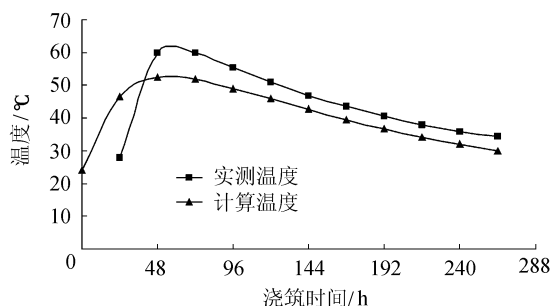


图7 16号中墩T2测点温度实测值与计算值时程变化过程线

4.2.2 闸墩内外温差的时间梯度分布

16号中墩距底板2 m处内外温差的时间梯度分布如图8所示,它是闸墩两个不同部位温降阶段的温度差值,由表面温度与中心温度相减所得。由图8可以看出在温升阶段由于通水冷却的效果明显,使得在这个阶段中心温度在同一时间段略低于表面温度,同时也可以看出相邻两日闸墩内外温差的时间梯度变化相对较小。

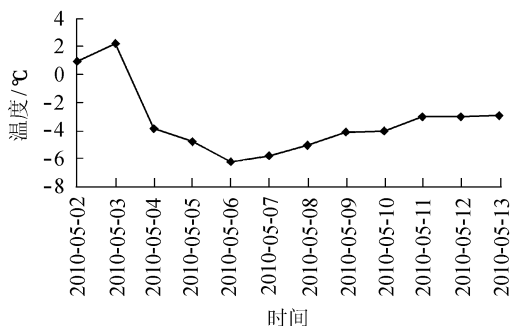


图8 16号中墩距底板2 m处内外温差时间梯度分布

4.2.3 闸墩表面温度变化的时间梯度分布

16号中墩测点表面温度变化的时间梯度分布如图9所示,可以看出降温初期混凝土的温度下降较快,后期相对平缓,最终随环境温度变化。表明通过调整温控措施,避免因温度变化过大使温度应力超过同一时刻混凝土的极限抗拉强度,从而避免产

生裂缝。

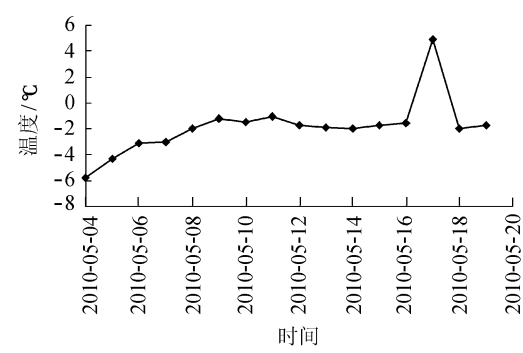


图9 16号中墩测点表面温度变化的时间梯度分布

4.2.4 混凝土应变监测分析

16号闸墩距底板7m处埋设了一支无应力计,该无应力计所测应变随着时间从拉应变向压应变变化,变化趋势平稳,经计算混凝土温度膨胀系数 $\alpha = 9.717 \times 10^{-6}$ 。16号闸墩应变计S6应变过程线如图10所示。监测结果表明应变与温度呈正相关关系,即温度升高应变相应增大,温度降低应变也相应降低。

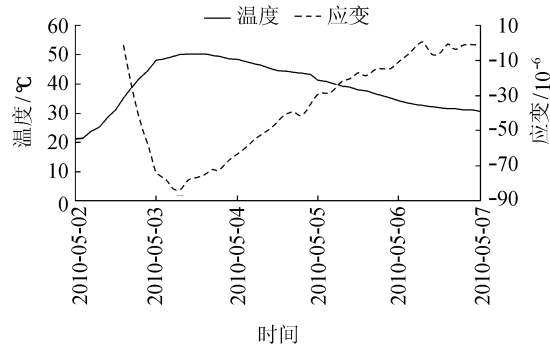


图10 16号闸墩S6应变计实测应变过程线

5 闸墩温控防裂措施

根据计算分析结果、现场监测资料及现场施工条件,该挡潮闸闸墩施工过程中实际采取如下温控防裂措施:

- a. 混凝土入仓温度控制在25℃以内,在夏季高温季节可采用加冰拌和、骨料冷却等措施来降低混凝土出机口温度,在运输过程中加盖遮光布。
- b. 闸墩内部布置冷却水管,控制最大温升幅度在30℃以内。结合现场每层浇筑厚度,冷却水管在高度方向的间距为0.6m,在闸墩下方距底板5m高度内布置。
- c. 高温季节施工时,在混凝土浇筑前可进行通水冷却以降低仓内温度。闸墩开始浇筑前必须进行通水试验,确保上下两路水管同时通水时都能达到指定通水流量(至少每路水管流量70 L/min)后方可开仓浇筑。

d. 混凝土浇筑后具有通水条件时即开始采用井水通水,水温16℃,在混凝土达到最高温度之前采用尽可能大的流量通水以降低最高温升。内部温度最高温升控制在30℃之内。

e. 闸墩内外表面最大温差温升阶段控制在5℃范围内,温降阶段控制在10℃以内。

f. 温降速率,从最高温度下降起7d内温降累计控制在14℃以内,日最大温降控制在4℃以内。

g. 混凝土龄期大于10d且当内外温差小于10℃后可进行拆模,可选择在一天中气温最接近混凝土温度的时间拆模,拆模后做必要的保温和保湿措施,在闸墩外侧涂刷养护剂,并包裹土工布。在闸墩底部1/3部分加铺保温板进行保温。

工程采取上述综合温控防裂措施浇筑的50个闸墩未出现一条温度裂缝,闸墩温控防裂取得了良好的效果。

6 结论

a. 闸墩底部区域受底板约束比较大,属于强约束区,在混凝土温度变化时容易产生温度裂缝。一般在闸墩下部2/3区域内布置冷却水管来降低由于水泥水化热引起的最高温升。工程在闸墩下部5m布置了冷却水管,间隔0.6m,温控效果较好,未发现可见裂缝。

b. 为减小混凝土温降阶段的降温幅度,在混凝土浇筑初期采取降低入仓温度和通水冷却等降温措施来减小由于混凝土水化热引起的最大温升,可以有效减小混凝土温降阶段的降温幅度。

c. 控制最大温升、内外温差及温降速率是大体积混凝土闸墩温控防裂的关键。

参考文献:

[1] 朱伯芳. 考虑水管冷却效果的混凝土等效热传导方程[J]. 水利学报,1991(3):28-34.

[2] 曹为民,吴健,闪黎. 水闸闸墩温度场及应力场仿真分析[J]. 河海大学学报:自然科学版,2002,30(5):48-52.

[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] 王建,刘爱龙. ABAQUS在大体积混凝土徐变温度应力计算中的应用[J]. 河海大学学报:自然科学版,2008,36(4):532-537.

[5] 傅少君,张石虎,解敏,等. 混凝土拱坝温控的动态分析理论与实践[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(1):113-122.

[6] 崔景川,陈声敢. 坞墩大体积混凝土施工期温度场仿真分析[J]. 水利与建筑工程学报,2010,8(3):127-128.

(收稿日期:2012-04-25 编辑:周红梅)