



金属冷却水管对船闸闸首底板冷却效果分析

苏超¹, 吴坤坤¹, 任威威²

(1. 河海大学 水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 河南省电力勘测设计院, 河南 郑州 450007)

摘要: 将混凝土坝中广泛应用的冷却水管技术引入到船闸结构的温控中。通过在边底板中埋设金属冷却水管与未采用相应措施的边底板及中底板进行对比, 分析冷却水管对闸首底板的温控效果。结果表明, 冷却水管可显著改善底板混凝土内部的温度分布, 对降低内外温差和温度应力起到较为明显的效果。

关键词: 闸首底板; 金属冷却水管; 温度场; 冷却效果; 应力场

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2014)06-0112-06

Cooling effect of metal cooling water pipes on bottom-board of lock head

SU Chao¹, WU Kun-kun¹, REN Wei-wei²

(1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Henan Electric Power Survey and Design Institute, Zhengzhou 450007, China)

Abstract: This paper introduces the cooling water pipe techniques widely used in concrete dams to the temperature controlling methods of lock structures. The study intends to find the temperature cooling effect of cooling water pipes, by laying metal cooling water pipes in one side bottom-board of lock head and making a contrast with corresponding middle bottom-board and side bottom-board which have no such measures. The result proves that cooling water pipes can improve the distribution of temperature field noticeably, and also achieve good results in cutting down the temperature difference in the construction of concrete and decrease the thermal stress very well.

Key words: lock head bottom-board; metal cooling water pipes; temperature field; cooling effect; stress field

船闸闸首作为空间薄壁结构, 易受环境温度改变的影响, 产生温度裂缝。对大量船闸的统计发现, 裂缝常发生在施工期, 重点部位是底板和闸墩, 因此有必要对其采取合理的温控措施以减少裂缝的发生。研究和实践表明, 在混凝土坝中通循环冷却水以降低混凝土的水化热温升是进行温控最有效的措施之一。朱岳明^[1]、李守义等^[2]对碾压混凝土重力坝局部高温区通冷却水, 很好地改善了坝体的温度分布; 彭辉^[3]利用冷却水管等间距布置、单向通水方式获得温度梯度的方法, 获取了在拱厚方向的最优封拱温度场; 付海峰等^[4]研究了拱坝在施工期和运行期冷却水管通水冷却对坝体温度场和温度应力场的影响, 提出了

满足设计规范要求的施工方案; 但是在船闸工程中, 对于预埋冷却水管的温控研究并不多^[5-8]。本文结合工程实例, 通过对某双线船闸闸首一边底板埋设冷却水管, 与未埋设冷却水管的相应部位进行温度场和应力场的对比, 分析施工期冷却水管对降低闸首底板混凝土水化热温升的实际效果, 为以后的工程实践提供了依据。

1 瞬态温度场和应力场理论基础

1.1 空间不稳定温度场的基本理论

考虑到混凝土热传导的各向同性, 瞬态温度场 $T(x, y, z, \tau)$ 的定解条件为满足相应初始温度和热学边界条件的控制微分方程:

收稿日期: 2013-10-09

作者简介: 苏超 (1960—), 男, 博士, 教授, 从事水工结构工程, 水运工程数值计算方法与试验研究。

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} = a \nabla^2 T + \frac{\partial \theta}{\partial \tau} \quad (1)$$

式中: a 为导温系数, $a = \frac{k}{\rho c}$; θ 为绝热温升。为了利用有限元进行求解, 上述热传导方程可转化为求解泛函的极小值问题, 利用有限元差分解法, 可得瞬态温度场的有限元方程:

$$\left[\mathbf{H} + \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \right] \times \mathbf{T}_{n+1} = \frac{1}{\Delta t_n} \mathbf{R} \times \mathbf{T}_n + \mathbf{F}_{n+1} \quad (2)$$

式中: \mathbf{H} 为热传导矩阵; \mathbf{R} 为热传导伴随矩阵。上式中右侧为已知, 即可通过上一时刻的温度场 \mathbf{T}_n 求解下一时刻的温度场 \mathbf{T}_{n+1} 。

1.2 水管冷却温度场的基本理论

任取一长度为 L 的冷却水管 (图 1), 根据热量平衡, 冷却水在 L 内的温度增量 ΔT_w 可表示为:

$$\Delta T_w = \frac{\lambda L}{c_w \rho_w q_w} \int_{r^0} \frac{\partial T}{\partial r} ds \quad (3)$$

式中: r^0 为冷却水管的外边界; $\frac{\partial T}{\partial r}$ 为冷却水管外缘的混凝土径向温度梯度, 为求得冷却水管沿程的水温, 可利用已知的水入口温度 T_{w1} , 累积各段的水温增量, 通过下式的递推方程求得第 i 断面的水温 T_{wi} :

$$T_{wi} = T_{w1} + \sum_{k=1}^{i-1} \Delta T_{wk} \quad i=2, 3, \dots \quad (4)$$

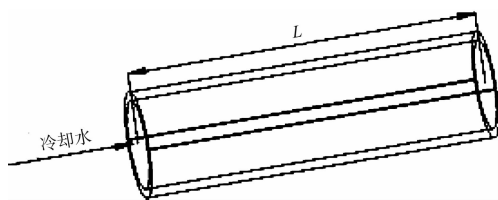


图 1 冷却水管示意

1.3 混凝土应力场计算原理

求解力学参数随时间变化的应力场可采用如下推导所得的有限元方程以求得各时段的应力增量:

$$\{\Delta \sigma_n\} = \overline{\mathbf{D}}_n \times \mathbf{B} \times \mathbf{K}^{-1} \times \left(\sum \Delta \mathbf{P}_n^i - \mathbf{D}_n \times \sum \Delta \epsilon_n^i \right) \quad (5)$$

式中: \mathbf{K} 代表整体刚度矩阵; \mathbf{B} 是几何矩阵; \mathbf{D}_n 表示弹性矩阵; $\sum \Delta \mathbf{P}_n^i$ 为包含外荷载、徐变、温度、自生体积变形、干缩等引起的结点荷载增量;

$\sum \Delta \epsilon_n^i$ 分别有徐应变、自由温度应变、自生体积变形和干缩变形等。另外

$$\overline{\mathbf{D}}_n = \mathbf{D}_n / [1 + E(\tau_n) \cdot C(t_n, \tau_n)] \quad (6)$$

式中: $E(\tau_n)$ 和 $C(t_n, \tau_n)$ 代表弹性模量和徐变度。

经过计算获得各时段的应力增量后, 通过将各时段的应力增量进行逐个累加, 便可得到任意时刻的应力场。

2 仿真分析在 ANSYS 中的实现

本文采用 ANSYS 软件模拟建模、加载和后处理, 利用 APDL 语言编写 macro 文件实现了对施工期船闸闸首分层分块浇筑的模拟及温度场和应力场的有限元计算, 并采用了间接法对热-结构耦合问题进行计算。为了将其功能及流程加以详细说明, 编制了图 2 所示的流程。

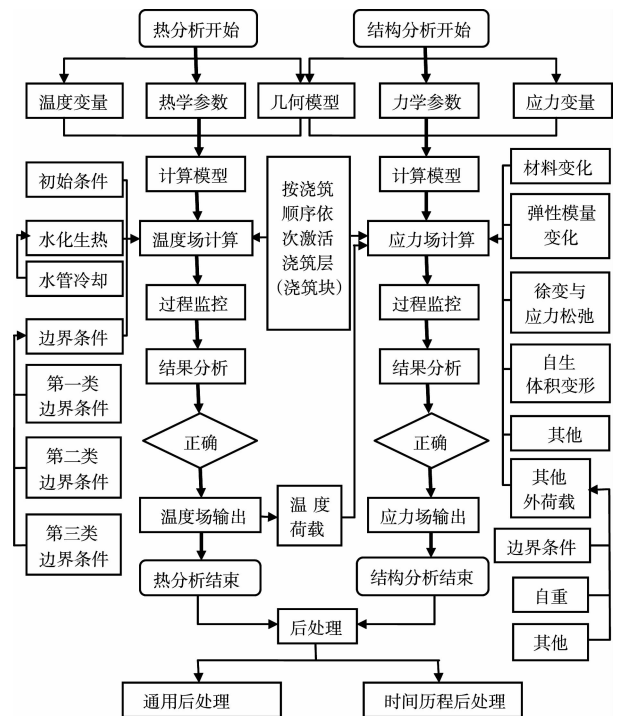


图 2 仿真分析流程

3 工程实例

某双线船闸为对称结构, 采取围堰式施工, 主体为 2 级水工建筑物, 上下游共 4 个闸首, 主要由底板、空箱和廊道等构成, 只有浇筑时间的差异。在左岸下闸首的左边底板厚度方向中间位

置埋设了冷却水管，钢管的管径为 3 cm，间距布置为 2 m，设有两个循环回路。为考虑对计算数据与实测数据进行拟合以获取完整的温度场，分别在上、下闸首的中底板和边底板的中心点以及靠

近表面处适当位置埋设传感器，采用差动电阻式温度计 DW-1 以及 FWC2000 型自动化监测装置，可实行远程监控和采集数据。地基和底板的主要材料参数见表 1，冷却水管的布置见图 3。

表 1 底板和地基主要热学和力学参数

部位	弹性模量/GPa	泊松比	比热/(kJ·kg ⁻¹ ·°C ⁻¹)	导热系数/(kJ·m ⁻¹ ·d ⁻¹ ·°C ⁻¹)	绝热温升/°C
底板(上闸首)	34.25(1 - e ^{-0.4τ^{0.33}})	0.167	0.920	210.00	51(1 - e ^{-0.701τ^{1.067}})
底板(下闸首)	34.25(1 - e ^{-0.4τ^{0.33}})	0.167	0.920	210.00	51(1 - e ^{-1.05τ^{1.067}})
地基	30	0.300	1.005	100.63	

注：τ 代表混凝土的龄期。

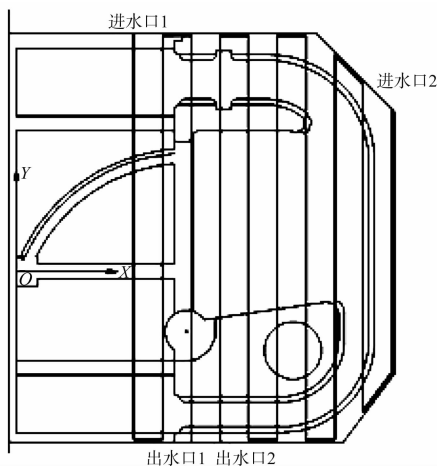


图 3 冷却水管布置

3.1 仿真模型的建立

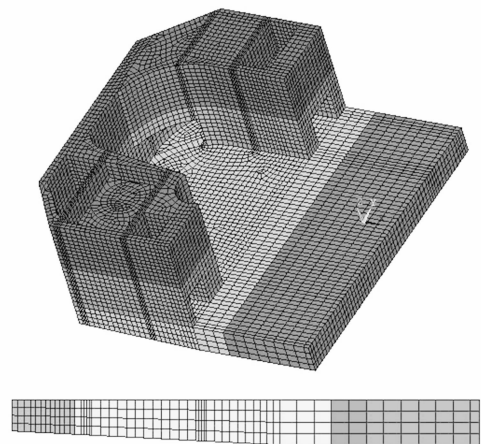
为提高计算效率，实际分析时选取闸首结构的一半进行有限元仿真计算，并建立了闸首-地基有限元仿真计算模型。其整体坐标系为：X 轴取为横河向，Y 轴取为顺河向，Z 轴方向竖直向上，坐标原点位于中底板上表面中心点向上 3.9 m 的位置。现场的浇筑顺序依次为中底板、边底板、廊道处边墩、空箱处边墩，最后是边底板与中底板之间的施工宽缝。冷却水管进行有限元模拟时采用了广泛使用的线单元，计算精度较高。闸首的三维网格模型见图 4。

3.2 结果分析

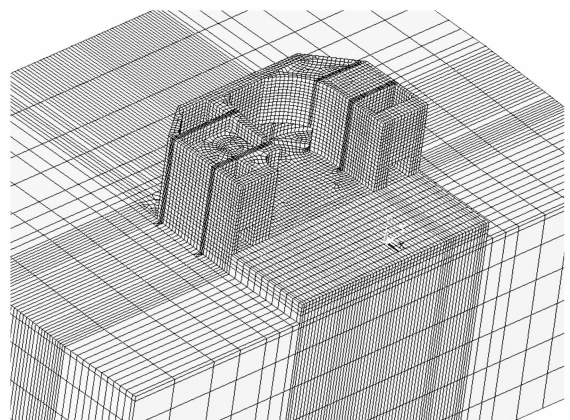
3.2.1 温度场

仿真分析时选取了各分层分块自开始浇筑至 90 d 龄期的闸首结构进行计算，实测数据与计算数据拟合得比较好，可以很好地反映浇筑

过程中的温度变化情况，仅表面测点由于受外界环境的影响较大，处于不断波动的状态，但其变化趋势与实测数据也是一致的。下闸首测点温度过程曲线见图 5，上、下闸首底板的温度场云图见图 6。



a) 闸首三维有限元网格模型及闸首底板网格立面



b) 闸首-地基三维网格模型

图 4 闸首三维网格模型图

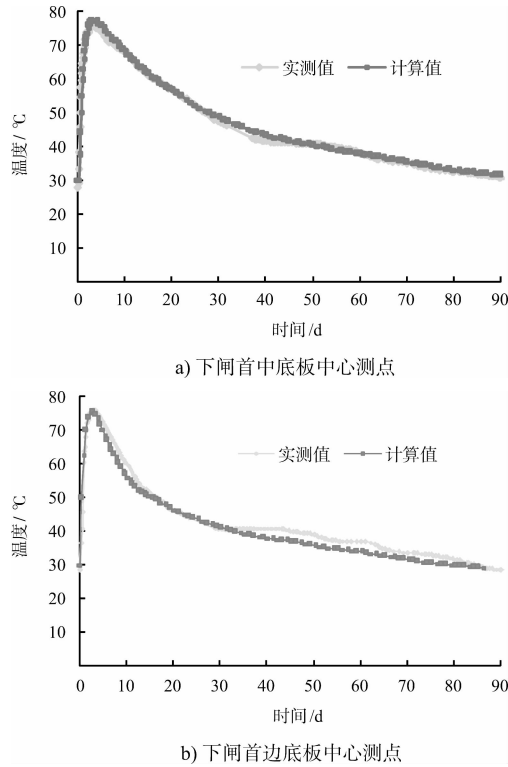


图 5 下闸首测点温度过程曲线

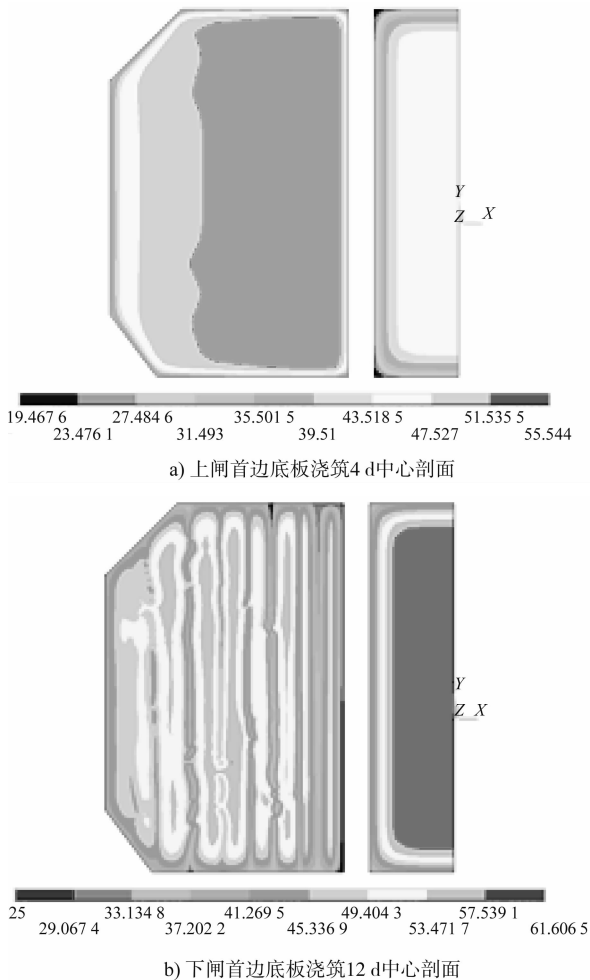


图 6 上、下闸首底板的温度场分布云图 (单位: °C)

1) 从图 5 可以看出, 冷却水管的冷却效果是显著的, 下闸首埋设冷却水管的边底板通水冷却后, 其中心点的降温速率要明显快于同时期浇筑且方量相近的中底板中心点的降温速率。由于冷却水管通水是从下闸首边底板浇筑 2 d 后开始的, 共通水 10 d, 所以对温度并没有产生明显的削峰作用, 其最高温度和中底板中心点的最高温度相近, 但是其降温效果是显著的。自冷却水管开始通水的 10 d 里, 中底板中心点温度从 76.3 °C 降到 60.3 °C, 平均降温速率为 1.6 °C/d, 边底板的中心点温度则从 76.6 °C 降到 52.1 °C, 平均降温速率为 2.45 °C/d。

2) 边底板浇筑约 4 d 左右, 其内部达到最高温度。对于上闸首边底板来说, 此时内外温差可达到约 14 °C。从图 6a) 所示的中心剖面温度云图可知, 此时边底板内部温度明显高于中底板内部温度, 这也是由于此时中底板早已浇筑, 水化生热有所减弱, 内部温度减小所致; 图 6b) 为冷却水管停止通冷却水后, 在 $Z = -5.2$ m 断面下闸首底板的温度分布云图, 可以较明显看出尽管边底板浇筑较晚, 但由于冷却水管的作用, 其内部温度相较于中底板要小得多。

3.2.2 应力场结果分析

温度场计算完成以后, 利用 ANSYS 软件将相邻荷载步所得的温差作为体荷载施加到对应结点进行温度应力的计算。弹性模量采用复合指数式^[9], 同时考虑到徐变的作用, 采用应力松弛系数法^[9]计算温度应力, 而自身体积变形产生的影响则根据与温度场对应时段内各个部位的收缩应变差, 作为初始应变施加到对应部位。将各个分析步经计算所得的温度应力增量进行累加, 即可得到每一时间点的温度应力, 通过与重力场的叠加, 即可得到各时刻的总应力值。

通过仿真分析可得, 边底板在浇筑约 4 d 时, 表面主应力达到最大值。上、下闸首边底板浇筑 4 d 后的上表面、侧表面应力分布云图见图 7。

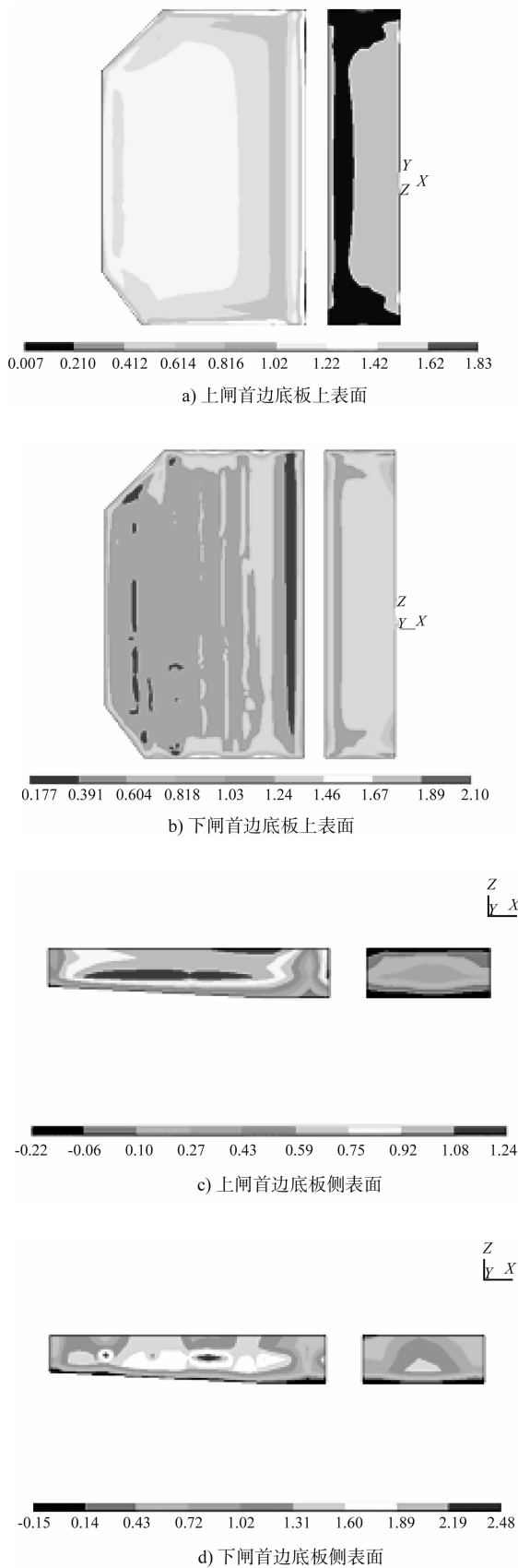


图7 上、下闸首边底板浇筑4 d后主拉应力分布云图 (单位: MPa)

上、下闸首底板的浇筑时间分别为3月和6月,浇筑所用的混凝土方量很接近。由图7c)可得,上闸首边底板上表面的主拉应力大于中底板,这是由于边底板的浇筑时间要晚于中底板所致(相差为15 d)。此时,中底板水化生热已逐渐减弱,内部混凝土的温度有较明显的下降,与浇筑初期混凝土内部温度高而外部温度低所产生的内部受压外部受拉相比,表面拉应力已有所下降,甚至开始出现外部受压内部受拉的状态。

与之形成明显对比的是,带有冷却水管的下闸首边底板的上表面与中底板上表面的主拉应力相比要小,这也表明了冷却水管在削弱混凝土内部水化生热的同时,也减小了混凝土表面的拉应力。对于靠近冷却水管的底板侧表面来说,仍会产生较大的拉应力,此时下闸首的侧表面最大拉应力甚至达到2.48 MPa(图3所示出水口附近),远大于上闸首侧表面最大拉应力,存在开裂的可能性。这是由于在热交换的作用下,下闸首冷却水管内水的温度沿程上升,特别是在冷却水管靠近底板侧表面的部位,温差会很大,由此产生了较大的拉应力。

4 结语

通过对施工期船闸闸首一边底板埋设冷却水管与未埋设冷却水管的边底板进行分析对比,得出了冷却水管在温控方面的显著效果。冷却水的降温作用削弱了底板混凝土内部水化热温升,降低了内外温差,使温度应力有所减小,同时也降低了裂缝生成的可能性。

不足之处是由于某些原因,冷却水管通水直到下闸首边底板浇筑2 d后才开始,期间也有过中断,所以对冷却水管的削峰作用没有得到体现,而且靠近冷却水管的混凝土由于存在较大的温度梯度,也会产生较大的拉应力。但在10 d的通水期,下闸首边底板中心点每天约比同龄期上闸首边底板中心点的降温速率快0.85 °C/d,速率约提高53.1%,可见降温效果是明显的。通过对船闸闸首底板合理的预铺冷却水管可起到很好的温控

效果,为后续工程的施工打下坚实的基础,对以后同类工程的温控提供了一种新的尝试。

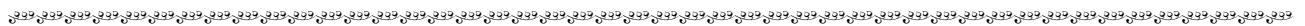
参考文献:

- [1] 朱岳明,张建斌. 碾压混凝土坝高温期连续施工采用冷却水管进行温控的研究[J]. 水利学报, 2002(11): 55-59.
- [2] 李守义,赵丽娟,周伟,等. 碾压混凝土重力坝冷却水管的冷却效果研究[C]//中国大坝委员会. 第五届碾压混凝土坝国际研讨会论文集(下册), 2007.
- [3] 彭辉,徐晓东,叶永,等. 拱坝大体积混凝土冷却水管计算方法[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2006(S2): 33-36.
- [4] 付海峰,李守义,赵风华,等. 碾压混凝土拱坝温控计算研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2009(4): 94-97.
- [5] 袁广林,黄方意,沈华,等. 大体积混凝土施工期的水化热温度场及温度应力研究[J]. 混凝土, 2005(2): 86-88.
- [6] 曹周红,刘晓平,王崇宇,等. 泥岩基础上船闸底板的温度应力特征分析[J]. 水运工程, 2008(2): 78-81.
- [7] 卜丁,杨斌. 船闸闸室结构三维有限元仿真分析[J]. 水运工程, 2010(9): 105-109.
- [8] 杜成斌,凌永宁. 船闸闸首施工期温度场和温度应力计

算分析[J]. 中国农村水利水电, 2001(6): 40-42.

- [9] 朱伯芳. 混凝土的弹性模量、徐变与应力松弛系数[J]. 水利学报, 1985(9): 54-61.
- [10] Bai Xinli, Wu Zeyu, Ma Wenliang, et al. Influence of water pipe cooling on thermal stresses in mass concrete [J]. Applied Mechanics and Civil Materials, 2012, 137: 12-15.
- [11] 朱伯芳,蔡建波. 混凝土坝水管冷却效果的有限元分析[J]. 水利学报, 1985(4): 27-36.
- [12] 朱岳明,徐之青,贺金仁,等. 混凝土水管冷却温度场的计算方法[J]. 长江科学院院报, 2003(2): 19-22.
- [13] 吴胜兴. 混凝土结构温度应力计算必须考虑的因素[J]. 水利水电科技进展, 1996(3): 26-29.
- [14] 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.
- [15] 郭磊,韩永林,黄养连,等. 混凝土表面保温和水管冷却的温控效果研究[J]. 人民长江, 2011(11): 27-31.
- [16] 张松涛,李民. ANSYS 在分析混凝土结构温度场及温度应力中的应用[J]. 中国水运: 理论版, 2006(5): 54-56.

(本文编辑 武亚庆)



(上接第107页)

5 结论

1) 受三峡水库蓄水运行的影响,东流水道上游来沙量大幅减少,水流呈清水下泄状态,造成了老虎滩前沿滩脊和东港进口冲刷,这是东港近期发展的主要原因。

2) 东流水道航道整治工程增加了老虎滩左侧(老虎滩北槽)河道阻力,改变了左岸东角冲边滩的演变特征,进而在一定程度上促进了东港发展;东港进口上游间或存在的非法采砂活动,也是东港发展的影响因素之一。

3) 上游来水来沙条件、目前东流水道的河势条件均使东港存在进一步发展的可能,但受地质条件限制,东港发展速度将趋缓并最终趋于稳定。

参考文献:

- [1] 雷国平,谭伦武. 长江下游东流水道航道整治工程初步设计报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2004.
- [2] 雷国平,郑惊涛. 长江下游东流水道航道整治二期工程可行性研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2011.
- [3] 赵德玉,谭伦武,郑英. 长江下游东流水道航道整治工程初步设计阶段动床模型试验研究报告[R]. 武汉: 长江航道规划设计研究院, 2004.
- [4] 刘洪春,张伟,李文全. 东流水道左岸边滩演变特征及该边滩演变对航道条件影响分析[J]. 水运工程, 2013(8): 110-114.

(本文编辑 郭雪珍)