

# 船闸廊道混凝土分层施工工艺优化及防裂分析



李 凯<sup>1</sup>, 王英凝<sup>2</sup>, 邓春林<sup>1</sup>, 余志鹏<sup>1</sup>, 于 方<sup>2</sup>

- (1. 中交四航工程研究院有限公司, 水工构造物耐久性技术交通行业重点实验室, 广东 广州 510230;  
 2. 中交四航局第五工程有限公司, 福建 福州 350003)

**摘要:** 针对船闸廊道混凝土采用分层工艺易开裂问题, 在给定的混凝土热学参数和边界条件基础上, 采用仿真软件 Midas FEA 模拟廊道混凝土在不同分层工艺以及通水冷却工况下内部温度场分布。结合廊道尺寸和外部约束, 评估不同分层工艺以及不同冷却水管间距下混凝土开裂风险。结果表明: 廊道底板、侧墙以及顶板单独浇筑开裂风险较大, 而将底板和上部侧墙、顶板和下部侧墙整体浇筑, 可以大幅降低混凝土开裂风险。通冷却水没有显著降低混凝土外约束应力作用下的开裂风险, 在混凝土温度场满足温控要求前提下, 建议取消通水冷却措施。

**关键词:** 船闸廊道; 分层施工; 大体积混凝土; 裂缝控制

中图分类号: U 641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)11-0232-08

## Optimization and crack prevention of concrete layered construction process of ship lock gallery

LI Kai<sup>1</sup>, WANG Ying-ning<sup>2</sup>, DENG Chun-lin<sup>1</sup>, YU Zhi-peng<sup>1</sup>, YU Fang<sup>2</sup>

- (1. Key Laboratory of Harbor&Marine Structure Durability Technology, Ministry of Communications,  
 CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;  
 2. The Fifth Engineering Company of CCCC Fourth Harbor Engineering Co., Ltd., Fuzhou 350003, China)

**Abstract:** Aiming at the problem that the concrete in the corridor of ship lock is easy to crack when concreting in lifts is adopted, based on the given concrete thermal parameters and boundary conditions, the simulation software Midas FEA is used to simulate the distribution of the internal temperature field of the concrete in the corridor under different concreting in lifts and water-through cooling conditions. Combined with corridor size and external constraints, the risk of concrete cracking under different concreting in lifts and different spacing between cooling pipes is evaluated. The results show that the concrete cracking risk is high when the bottom plate, side wall and roof are poured separately, and the concrete cracking risk can be greatly reduced when the bottom plate and upper side wall, top plate and lower side wall are poured as a whole. Cooling water does not significantly reduce the cracking risk of concrete under external constraint stress. On the premise that the concrete temperature field meets the temperature control requirements, it is recommended to cancel the measure of cooling water.

**Keywords:** lock gallery; layered construction; mass concrete; crack control

船闸廊道是船闸运行的关键部位, 在船闸灌泄水过程中发挥了重要作用。作为典型的大体积构件, 廊道结构具有体积大、跨度长、易开裂等特点, 一直是船闸施工关注的重点<sup>[1]</sup>。廊道采用全断面浇筑施工工艺具有不经济、施工难度大等

特点, 故浇筑廊道混凝土多采用分层浇筑工艺。

国内学者对廊道混凝土裂缝控制进行了相关试验研究, 李华等<sup>[2]</sup>提出在混凝土内部掺加氧化镁膨胀剂, 可以有效补偿混凝土温降阶段微应变40以上, 显著提升船闸混凝土施工期抗裂性; 刘

子睿<sup>[3]</sup>在混凝土内部掺加纤维, 对廊道混凝土抗裂有一定的改善效果; 陈红旗<sup>[4]</sup>、房建国等<sup>[5]</sup>提出在廊道外墙圆弧段设置后浇带、先浇体施工、设置应力缓和沟等施工工艺, 从而改善混凝土约束, 降低廊道混凝土开裂风险。范洪浩等<sup>[6]</sup>、邓春林等<sup>[7]</sup>在廊道外墙和顶板布置防裂钢筋网, 提升廊道表层混凝土配筋率, 廊道变断面转角和孔洞周围等部位增设抗裂钢筋, 从而提高表层混凝土抵抗内部温度应力的水平, 减少由于温度变化和混凝土收缩导致的混凝土裂缝。

## 1 工程概况

地处西南地区某独立式船闸工程, 在 7—10 月采用分层施工工艺浇筑上闸首右边墩廊道混凝土, 廊道断面较大且混凝土单次浇筑量大。通过在廊道迎水面侧墙和顶板表层铺设细而密的温度钢筋, 采用分冷骨料、制冷水等措施降低拌合物的出机温度以及在混凝土温升阶段通冷却水, 预防廊道大体积混凝土开裂。但是在混凝土浇筑完 1 个月内, 陆续发现廊道侧墙表面、顶板表面混凝土出现了不同程度的裂缝, 尤其是在沿廊道侧墙长度 1/2、1/4、1/8 等位置有规律地出现了深层裂缝或贯穿裂缝, 见图 1。裂缝的出现不但影响船闸结构承载力, 还增加输水廊道渗漏的风险, 降低了船闸结构的抗渗和耐久性能。



图 1 廊道混凝土开裂

## 2 开裂原因

为了有效预防廊道裂缝的出现, 在充分调研廊道构造设计、混凝土原材料及配合比、施工工艺等信息基础上, 从设计、材料、施工 3 个角度

对廊道混凝土开裂原因进行分析, 发现混凝土浇筑间隔控制不当、施工工艺不合理是导致船闸廊道开裂的主要原因。该船闸采用图 2 所示的分层方案, 由于廊道分层数较多且浇筑间隔超过 7 d, 新浇筑混凝土在降温收缩和干燥收缩过程中受老混凝土约束, 导致廊道混凝土开裂严重。

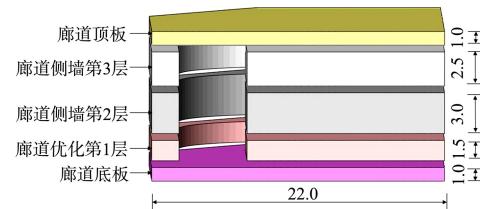


图 2 廊道实际分层方案 (单位: m)

式(1)为英标 CIRIA C660<sup>[8]</sup>提出的混凝土约束计算公式, 其中旧混凝土对新混凝土的约束系数与新、旧浇筑体的界面截面积、弹性模量相关。

$$R_j = \frac{1}{1 + \frac{A_n E_n}{A_0 E_0}} \quad (1)$$

式中:  $A_n$  为新浇筑混凝土截面积 ( $\text{m}^2$ );  $A_0$  为旧混凝土截面积 ( $\text{m}^2$ );  $E_n$  为新浇筑混凝土弹性模量 (MPa);  $E_0$  为老混凝土弹性模量 (MPa)。

由于输水廊道底板面积较大, 导致底板对侧墙的约束较大, 相反, 侧墙截面积较小, 其对顶板约束明显小于底板对侧墙的约束。采用图 3 所示分层方案, 上部侧墙受下部侧墙约束明显小于图 2 分层方案中底板对侧墙的约束, 且廊道顶板和底板随侧墙整体浇筑, 混凝土开裂风险较小。

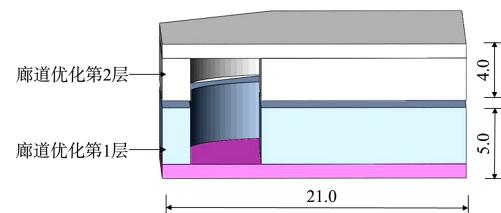


图 3 廊道分层优化方案 (单位: m)

目前, 针对廊道分层工艺的抗裂性能研究甚少, 本文将根据不同分层方案下廊道温度场及抗裂安全系数, 评价不同分层方案下廊道混凝土抗裂性能。

### 3 廊道温度场仿真

#### 3.1 廊道模型参数

采用 Midas FEA 有限元软件构建不同浇筑厚度下混凝土温度场仿真计算, 求得船闸廊道在不

同分层方式下混凝土构件温度场随时间的变化规律。根据廊道实际尺寸建立模型, 不同分层方案构件三维尺寸见图 4, 选用三维实体单元对建立的廊道构件进行网格划分。

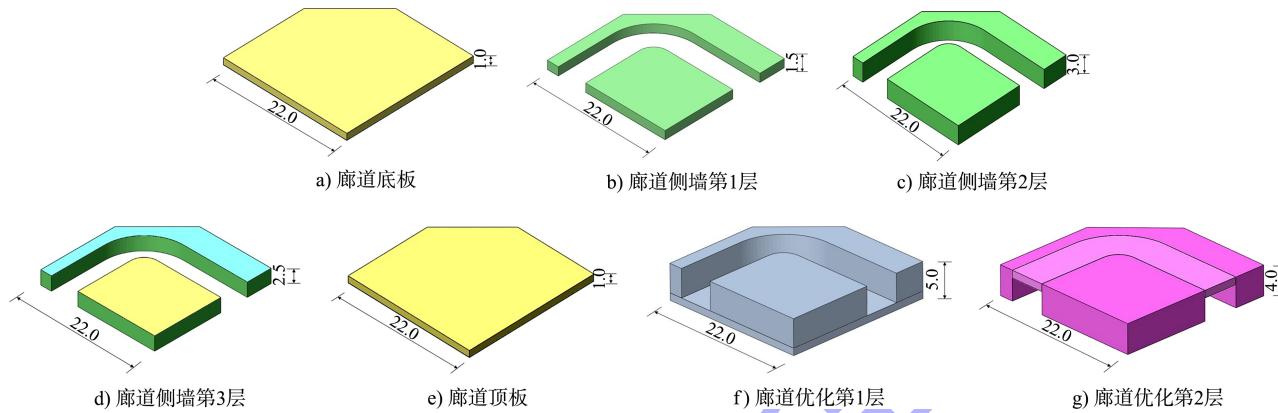


图 4 三维实体模型 (单位: m)

#### 3.2 材料参数

廊道混凝土标号为 C25, 混凝土比热容为  $0.96 \text{ kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ , 膨胀系数为  $10^{-5}$ , 混凝土导热系数取  $3 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。混凝土绝热温升计算公式采用复合指数式模型, 热原函数一次性直接赋予混凝土模型:

$$T(t) = \frac{WQ}{c\rho} (1 - e^{-mt}) = 34.7(1 - e^{-1.4t}) \quad (2)$$

式中:  $W$  为混凝土的胶凝材料用量 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;  $Q$  为胶凝材料水化热总量 ( $\text{kJ}/\text{kg}$ ) ;  $c$  为混凝土的比热 ( $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$ ) ;  $\rho$  为混凝土密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) ;  $t$  为时间 (d) ;  $m$  为与水泥品种、浇筑温度等有关的系数 ( $\text{d}^{-1}$ )。

#### 3.3 边界条件

温度场仿真分析仅考虑热对流, 忽略阳光辐射对混凝土温度场的影响, 混凝土表面散热系数与保温材料厚度、导热系数、环境气候有关, 取  $13 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ 。

假设混凝土入模温度是均匀的, 即混凝土初始计算温度作为混凝土入模温度, 取  $T_0 = 24^\circ\text{C}$ 。根据船闸所在区域的气象条件, 通过三角函数拟

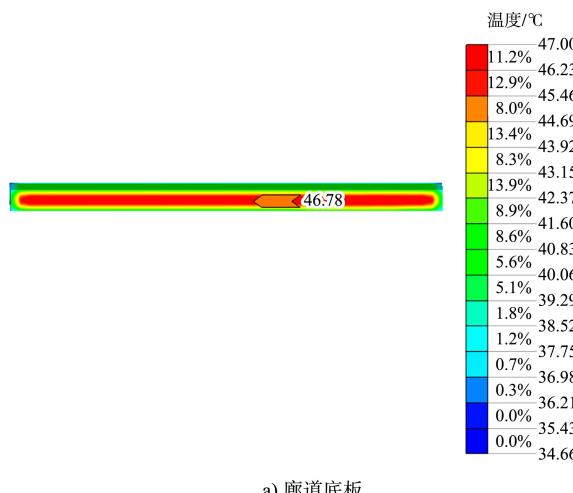
合外界气温变化过程:

$$T(t) = 30 + 5 \sin \left[ \frac{\pi}{12}(t + 24) \right] \quad (3)$$

#### 3.4 温度场模拟结果

##### 3.4.1 浇筑厚度对廊道混凝土温度的影响

为了探究输水廊道在不同分层浇筑工艺下混凝土内部温度场变化, 利用上述参数化的 Midas 模型, 对不同分层方案下廊道构件在水化热作用下的瞬态温度场进行计算。混凝土内部中心温度达到温峰时的温度场分布见图 5。



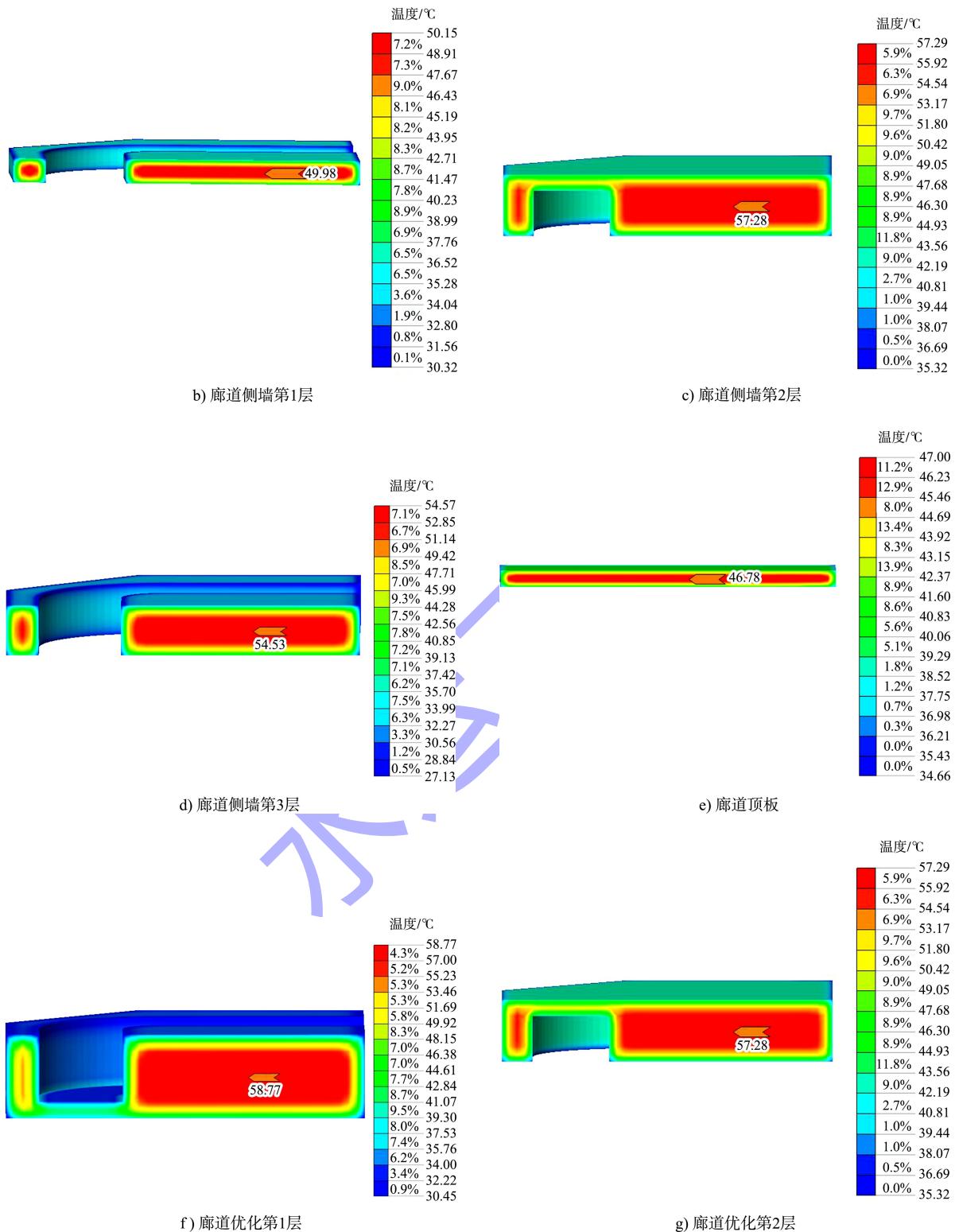


图 5 廊道温度场云图

图 6 为混凝土内部最高温度、最大内表温差与浇筑厚度历程曲线, 当浇筑厚度不超过 3 m 时, 混凝土最大内表温差、中心最高温度大小均随着混凝土浇筑厚度增加而线性增大; 当浇筑厚度超

过 3 m 时, 混凝土最大内表温差、中心最高温度大小均随着混凝土浇筑厚度增加而缓慢增大。图 7 为最大内表温差、中心最高温度出现时间与浇筑厚度的曲线, 随着浇筑厚度增加, 混凝土最大内

表温差、中心最高温度出现时间均相应延迟。从图 6、7 可以看出, 两种不同分层方案下混凝土中心最高温度以及最大内表温差均满足标准 JTS/T 202-1—2022《水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范》<sup>[9]</sup> 中不超过 70、25 ℃的规定要求。

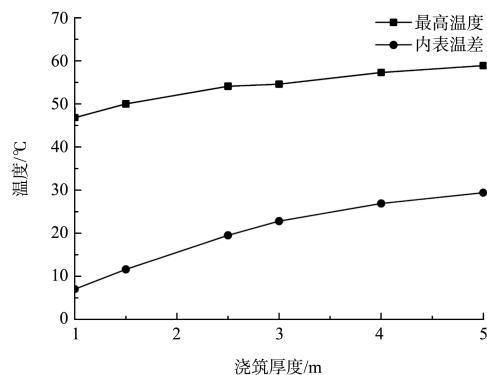


图 6 混凝土中心最高温度、最大内表温差曲线

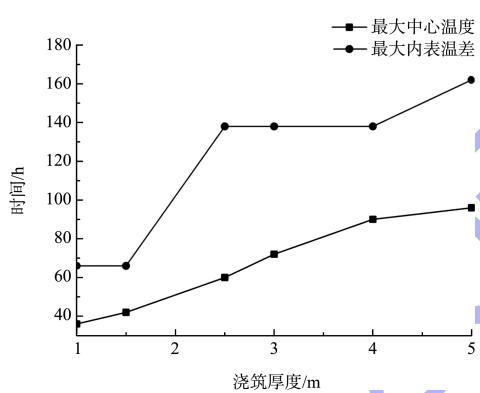


图 7 混凝土中心最高温度、最大内表温差出现时间曲线

### 3.4.2 冷却水施工工艺对廊道混凝土温度场的影响

为探究施工期混凝土内部通冷却水对混凝土防开裂的效果, 以廊道优化第 2 层为例, 开展无冷却水管、冷却水管间距分别为 1.0、1.5 m 3 种工况下混凝土温度场仿真。从混凝土浇筑开始通冷却水, 直至混凝土达到温峰后结束通水。冷却水管水平间距、立面间距、水管与结构表面距离均为 1 m。冷凝管和冷却水仿真参数取值为: 1) 冷凝管。直径 0.03 m; 对流系数 3.86 W/(m<sup>2</sup>·T); 2) 冷却水。比热 4 186 J/(kg·℃); 质量密度 1 000 kg/m<sup>3</sup>; 入口温度 25 ℃; 流量 1.2 m<sup>3</sup>/h; 通水时长 120 h。不同冷却水管间距下混凝土内部达到最高温度时温度场分布见图 8。

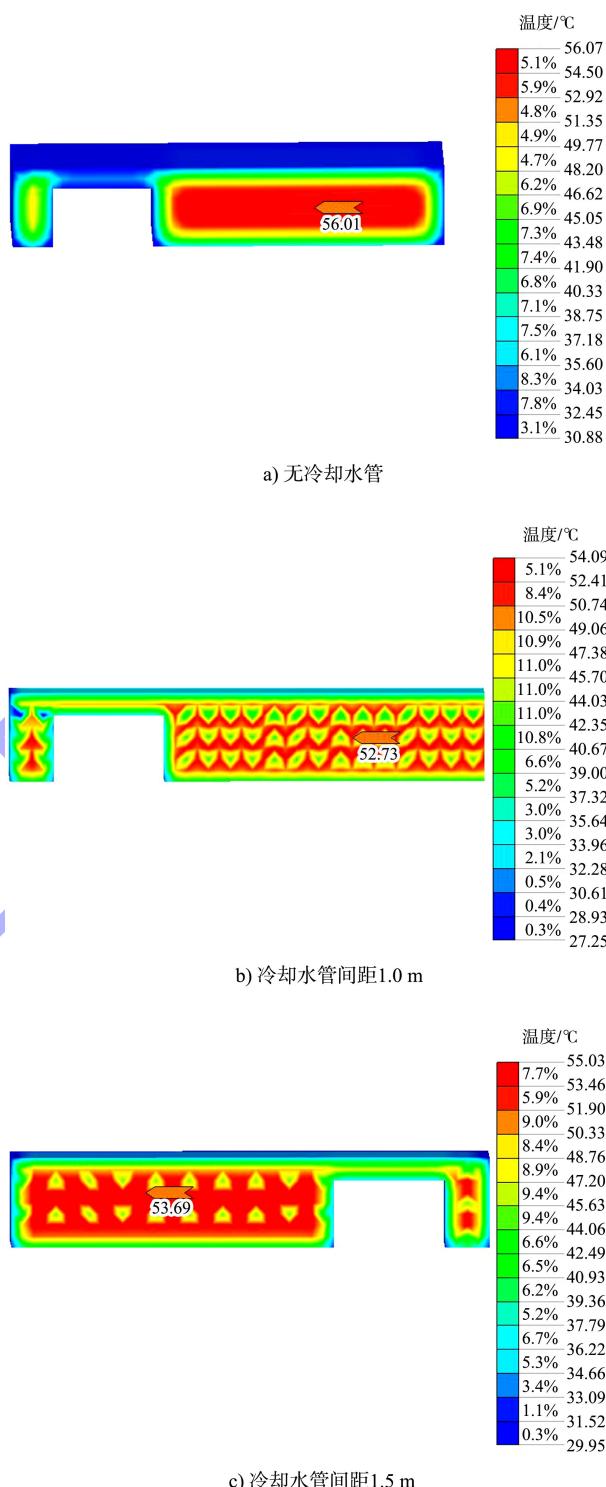


图 8 冷却水管间距对混凝土温度场影响

在不通冷却水工况下, 混凝土内部中心温度在浇筑完 168 h 后达到最大值 54.8 ℃, 内表温差在浇筑完 144 h 后达到最大值 28.6 ℃; 预埋间距 1.0 m 冷却水管后, 混凝土内部中心温度在浇筑完 48 h 后达到最大值 52.7 ℃, 内表温差在浇筑完

72 h 后达到最大值 19.3 ℃; 预埋间距 1.5 m 冷却水管后, 混凝土内部中心温度在浇筑完 72 h 后达到最大值 53.9 ℃, 混凝土内表温差在浇筑完 168 h 后达到最大值 25.1 ℃。对比不同冷却水工况, 冷却水管间距 1.0、1.5 m 工况下混凝土最高温度依次降低了 2.1、0.9 ℃, 内表温差最大值也降低了 9.3、3.5 ℃。

从图 9、10 可以看出, 在混凝土温升阶段通冷却水, 缩短了最高温度和最大内表温差出现时间, 降低混凝土内部最高温度和最大内表温差, 为混凝土温控创造了有利条件。

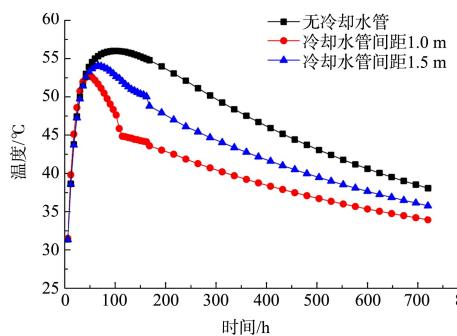


图 9 中心温度-时间历程曲线

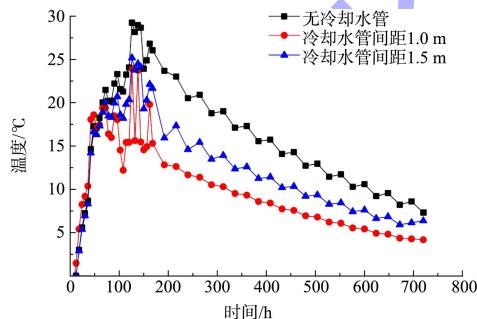


图 10 内表温差-时间历程曲线

#### 4 开裂风险评估

混凝土抗裂安全系数是将不同浇筑厚度下构件自约束应力、外约束应力与抗拉强度参考值进行比较分析, 以抗裂安全系数  $K$ (混凝土抗拉强度与约束应力值比值,  $\geq 1.15$  时开裂风险较小)为评价标准, 综合考虑抗裂安全系数富余量对构件安全性的影响。其中, 自约束应力的抗裂安全系数  $K_z$  和外约束应力的抗裂安全系数  $K_w$  分别按式(4) (5) 进行计算:

$$K_z = f_{tk}/\sigma_z \quad (4)$$

$$K_w = f_{tk}/\sigma_w \quad (5)$$

式中:  $\sigma_z$  为因混凝土浇筑体里表温差产生自约束拉应力值(MPa);  $\sigma_w$  为外约束条件下综合降温产生的拉应力值(MPa);  $f_{tk}$  为混凝土的抗拉强度标准值(MPa)。

#### 4.1 自约束应力对廊道防裂性能影响

混凝土自约束应力与内表温差大小呈线性关系, 内表温差大小随混凝土浇筑厚度增加而增大, 混凝土产生的自约束应力亦较大。在温升阶段, 混凝土内表温差大小逐渐增大直至混凝土内部达到温峰时刻为止, 此阶段混凝土抗裂安全系数逐渐减小; 在降温阶段, 内表温差逐渐减小直至混凝土内部温度恢复至环境温度, 此阶段混凝土抗裂安全系数逐渐增大, 最终随环境温度变化呈周期性波动。

从图 11 可以看出, 在两种不同分层工艺下混凝土自约束抗裂安全系数均超过 1.15, 由自约束应力导致混凝土开裂的风险较低。此外, 廊道优化第 1、2 层浇筑厚度均大于廊道底板、廊道侧墙和廊道顶板, 导致二者自约束应力较大, 因此自约束抗裂安全系数偏小。

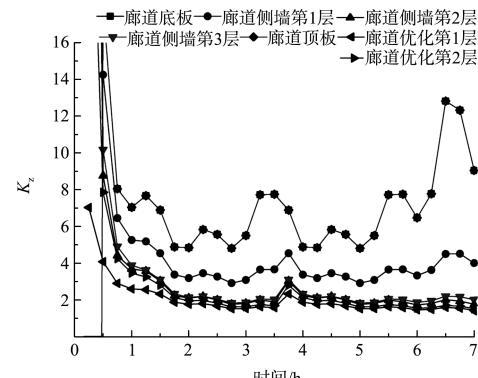


图 11 浇筑厚度对自约束抗裂安全系数的影响

从图 12 抗裂安全系数结果可以看出, 在大体积混凝土施工期通冷却水, 有助于降低混凝土内表温差, 明显高于未通冷却水的抗裂安全系数。混凝土开裂性能从强到弱依次为: 冷却水管间距 1.0 m、冷却水管间距 1.5 m、无冷却水管。

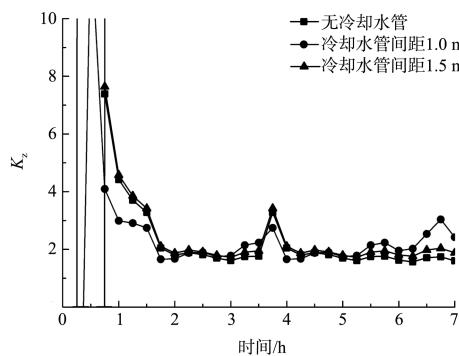


图 12 冷却水对自约束抗裂安全系数的影响

#### 4.2 外约束应力对廊道防裂性能影响

在水化热温升阶段，混凝土膨胀受到外部介质约束从而在混凝土内部产生压应力，此阶段混凝土产生温度裂缝概率较低；在降温阶段，混凝土收缩变形受到基础、老混凝土约束从而在混凝土内部产生拉应力。当拉应力超过混凝土极限拉应力时，混凝土开裂。

根据廊道混凝土各阶段的降温收缩和干燥收缩得到混凝土综合降温差，以天为时间步长，结合表 1 中外约束计算参数取值，计算不同浇筑厚度下廊道混凝土的外约束应力，并根据松弛系数计算各阶段产生的应力延续至某一龄期的应力残留值，从而计算混凝土在 0~30 d 内外约束应力的抗裂安全系数。

表 1 水平变形刚度

构件	浇筑高度/m	浇筑长度/m	水平变形刚度 $C_x/(N \cdot mm^{-3})$
底板	1.0	22	1.50
侧墙第 1 层	1.5	22	1.50
侧墙第 2 层	3.0	22	1.25
侧墙第 3 层	2.5	22	1.25
顶板	1.0	22	1.25
廊道第 1 层	5.0	22	1.50
廊道第 2 层	4.0	22	1.25

图 13 为廊道混凝土在不同分层方案下外约束抗裂安全系数时间历程曲线，结果表明：单独浇筑廊道底板、侧墙、顶板时，混凝土抗裂安全系数均小于 1.15，廊道混凝土各层构件开裂风险较大。廊道优化第 1、2 层的抗裂安全系数均大于廊道实际分层方案。由于优化后分层层数减少，可以大幅减少裂缝数量，提升廊道整体抗裂性能。

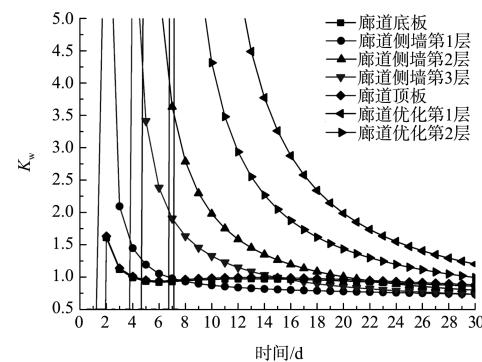


图 13 浇筑厚度对外约束抗裂安全系数的影响

根据过往船闸施工经验看，由外约束应力过大引起的温度收缩裂缝的是船闸结构最常见的病害之一。温度收缩裂缝大多为深层裂缝或者贯穿裂缝，导致混凝土防渗治理难度较大，对船闸结构的安全性和稳定性造成了不利影响。因此，外约束应力过大导致混凝土开裂才是大体积混凝土裂缝控制关注的重点，在廊道混凝土施工过程中应重视保温保湿养护工作，避免混凝土温度收缩和干燥收缩过大导致混凝土开裂。

图 14 为通冷却水对外约束抗裂安全系数的影响，在不通冷却水和通冷却水两种工况下时，混凝土外约束应力作用下的抗裂安全系数均超过 1.15，廊道开裂风险较小。对比无冷却水工况下，在混凝土温升阶段，外约束抗裂安全系数随着冷却水管间距减小而降低；在降温后期，外约束抗裂安全系数趋于接近。因此，在施工期通冷却水没有降低外约束应力作用下混凝土开裂风险。

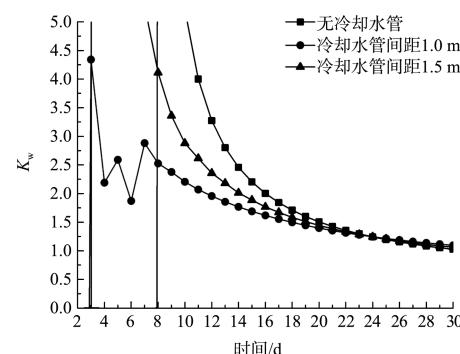


图 14 通冷却水对外约束抗裂安全系数的影响

#### 5 结论

1) 在廊道混凝土温度满足温控要求基础上，应尽量减少分层层数，避免采用底板、侧墙和顶

板单独浇筑的施工工艺。

2) 在混凝土内部预埋冷却水管可以降低混凝土内部最高温度和内表温差, 并可降低混凝土自约束应力, 但没有显著降低混凝土外约束应力。因此, 在混凝土温度满足温控要求的基础上, 建议取消冷却水管施工工艺。

3) 外约束应力过大导致混凝土开裂对船闸结构的安全性、稳定性会造成不利影响, 在混凝土裂缝控制中应重点关注。

## 参考文献:

- [1] 鲍颖杰. 新坝船闸输水廊道混凝土裂缝防治措施[J]. 水运工程, 2007(7): 85-88.
- [2] 李华, 田倩, 赵海涛. 氧化镁膨胀剂对船闸施工期混凝土开裂风险的影响[J]. 水运工程, 2018(1): 152-159.
- [3] 刘子睿. 船闸输水廊道混凝土抗裂性能研究[D]. 重庆:

(上接第 231 页)

## 参考文献:

- [1] 于利伟, 朱汉华, 钟骏杰, 等. 绞吸式挖泥船加气输送试验系统设计与数据分析[J]. 交通与计算机, 2006(4): 101-104.
- [2] 朱汉华, 范世东, 钟骏杰, 等. 挖泥船管道输泥的加气助送阻力特性试验研究[J]. 船海工程, 2008(2): 120-122.
- [3] 汤勃, 孔建益, 饶润生. 管道输送加气助送技术研究[J]. 湖北工业大学学报, 2008(3): 81-83, 86.
- [4] 熊庭, 范世东, 朱汉华, 等. 疏浚管道加气输送阻力特性研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),

重庆交通大学, 2020.

- [4] 陈红旗. 船闸廊道混凝土裂缝治理探索[J]. 交通科技, 2013(6): 125-128.
- [5] 房建国, 谢耀峰. 船闸输水廊道裂缝的成因及防治措施[J]. 水运工程, 2006(9): 98-102.
- [6] 范洪浩, 邓春林, 余春辉, 等. 小溪滩船闸混凝土结构裂缝控制技术[J]. 水运工程, 2017(2): 110-114.
- [7] 邓春林, 范洪浩, 张琴飞, 等. 船闸工程混凝土裂缝控制技术[J]. 水运工程, 2015(3): 123-127.
- [8] BAMFORTH P B. Early-age thermal crack control in concrete: CIRIA C660 [S]. London: Construction industry research and information association, 1981.

- [9] 中交武汉港湾工程设计研究院有限公司. 水运工程大体积混凝土温度裂缝控制技术规范: JTS/T 202-1—2022[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2022.

(本文编辑 王传瑜)

2011, 35(3): 554-557.

- [5] 汤勃, 孔建益, 饶润生. 管道气体助送的加气装置试验研究[J]. 机械设计与制造, 2011(6): 152-154.
- [6] 蔡勇. 疏浚船加气减阻装置结构优化与特性参数研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2013.
- [7] 熊庭. 绞吸式挖泥船管道加气输送技术研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2011.
- [8] 林煜, 袁宝来, 赵志赫. 厦门马銮湾疏浚排泥管道注气输送技术[J]. 水运工程, 2019(S2): 74-77.

(本文编辑 王传瑜)

## · 消息 ·

### 福州可门港 1# ~ 3# 泊位扩改工程水工主体完工

近日, 三航局承建的福建福州可门港 1# ~ 3# 泊位扩能改造工程水工主体完工。

该项目水工工程主要建设内容为将原 1# ~ 3# 泊位提级扩能改造为 2 个 30 万吨级通用散货泊位, 水工主体包括高桩梁板式码头平台、高桩梁板式“L”形栈桥及高桩墩台。

项目建成后, 将极大提高福州港口货物吞吐能力, 助力福州港迈向国际深水大港。