



# 船闸工程大体积混凝土裂缝控制施工技术

符业晃<sup>1</sup>, 代应刚<sup>2</sup>, 李泳龙<sup>3</sup>

(1. 中交第四航务工程局有限公司, 广东 广州 510290;  
2. 四川港航建设工程有限公司, 四川 成都 610023;  
3. 四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

**摘要:** 针对船闸大体积混凝土建筑物浇筑容易出现温度裂缝的难题, 通过优化施工配合比设计、埋设冷却水管、控制浇筑的层间厚度及间歇时间、表层保湿养护等多重裂缝控制施工技术措施, 实现了龙溪口船闸大体积混凝土的裂缝控制, 同时利用传感器采集混凝土温度数据, 对控裂措施进行效果评价。现场实际应用中, 浇筑后混凝土温峰在 32.1~41.4 ℃之间, 内表温差在 9.6~16.4 ℃之间, 均远低于温控指标的要求, 未产生可见温度裂缝。浇筑时同步成型的混凝土干缩 C20 试块 28 d 最大干缩率为同养  $228 \times 10^{-6}$ , 标养  $182 \times 10^{-6}$ , 表明混凝土温降阶段大体积混凝土的抗裂性能得到大幅提高。

**关键词:** 大体积混凝土; 温控; 控裂; 配合比优化; 自动化

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2023)10-0099-05

## Construction technology of crack control for large volume concrete in ship lock engineering

FU Yehuang<sup>1</sup>, DAI Yinggang<sup>2</sup>, LI Yonglong<sup>3</sup>

(1. China Communications Fourth Navigation Engineering Bureau Co., Ltd., Guangzhou 610213, China;  
2. Sichuan Port and Channel Construction Engineering Co., Ltd., Chengdu 610023, China;  
3. Sichuan Communication Surveying & Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

**Abstract:** In response to the difficult problem of temperature cracks in the pouring of large volume concrete buildings in ship locks, this paper achieved crack control of the large volume concrete at Longxikou ship lock by optimizing the construction mix design, burying cooling water pipes, controlling the interlayer thickness and intermittent time of pouring, and maintaining the surface moisture. Meanwhile, sensors are used to collect concrete temperature data to evaluate the effectiveness of the crack control measures. In practical field applications, the temperature peak of concrete after pouring is between 32.1~41.4 ℃, and the internal surface temperature difference is between 9.6~16.4 ℃, both of which are far below the requirements of temperature control indicators without visible temperature cracks. The maximum 28-day dry shrinkage of C20 test blocks formed synchronously during pouring is  $228 \times 10^{-6}$  in the same curing period and  $182 \times 10^{-6}$  in standard curing room. This indicates that the crack resistance of large volume concrete has been greatly improved during the temperature drop stage of concrete.

**Keywords:** large volume concrete; temperature control; crack control; optimization of mix proportions; automation

随着内河航运高速发展, 大型船闸工程不断兴建, 大体积混凝土在船闸工程中的应用逐渐增多<sup>[1]</sup>。大体积混凝土施工过程中不可避免会出现

各种问题, 其中大体积混凝土控裂是关键, 裂缝的产生轻则会影响到工程的外观质量, 重则将影响工程的实体质量<sup>[2]</sup>。因此有必要研究船闸工程

收稿日期: 2023-06-07

作者简介: 符业晃 (1984—), 男, 高级工程师, 从事水利水电工程施工管理。

大体积混凝土裂缝控制施工技术。

目前，在控制混凝土温度裂缝的施工技术措施方面已开展了大量研究。张子明等<sup>[3]</sup>通过试验研究表明混凝土的养护温度是影响水泥水化反应速率的重要因素。樊悦<sup>[4]</sup>、李昂<sup>[5]</sup>采用有限元数值模拟研究表明分层浇筑、跳仓法施工对于混凝土温控防裂具有重要作用。我国现已总结形成了优先采用中低热水泥、掺加粉煤灰等掺和料、人为降低入仓温度、合理分层与分块、预埋冷却水管降温、浇筑完成后养生保护等一系列措施与经验<sup>[6]</sup>。

本文结合以往的工程经验，通过多重裂缝控制施工技术措施，实现了龙溪口船闸大体积混凝土的裂缝控制，同时利用传感器采集混凝土温度数据，并通过模拟计算对混凝土开裂风险进行评估，为创建示范工程提供支撑。

## 1 工程概况

岷江龙溪口航电枢纽工程是岷江乐山—宜宾 162 km 河段航电梯级开发的第 4 级，建设Ⅲ级船闸 1 座(预留二线船闸位置)。龙溪口船闸尺寸为 220 m×34 m×4.5 m(闸室长度×闸室宽度×门槛水深)，水级 17.94 m，可通行 2×1 000 t 船队，单向年过闸货运量 1 395.36 万 t。

根据枢纽布置，龙溪口船闸位于右岸主河槽，船闸轴线与坝轴线正交，船闸上闸首位于挡水前

沿，船闸主要由上游引航道、上闸首、闸室、下闸首及下引航道等组成，全闸总长 1 379.53 m。

龙溪口船闸主要水工建筑物包括上下闸首边墩和底板、闸室闸墙和底板、上下引航道导航墙和隔流板墩、靠船建筑物及上下锚地建筑物。其中上闸首采用整体式结构，下闸首和闸室采用分离式结构，船闸主体工程均为控制温度裂缝产生的大体积混凝土，浇筑时应采取措施控制温度裂缝产生。

## 2 裂缝控制措施

### 2.1 设计配合比优化

为达到控裂目的，可以从原材料进行控制，通过优化混凝土配合比，采用低热硅酸盐水泥、减少水泥用量，降低水泥水化产生的热量。

最终选定采用 P. LH42.5 低热硅酸盐水泥，F 类Ⅱ级粉煤灰、高效减水剂、细骨料混合人工砂和天然砂(细度模数 2.6)，连续集配粗骨料(小石 5~20 mm，中石 20~40 mm，大石 40~80 mm)。然后通过添加掺量较大的粉煤灰、优质低热硅酸盐水泥以及高效减水剂进行混凝土的试拌。为确定浇筑混凝土的最优配合比，根据以往船闸工程大体积混凝土配合比经验(表 1)，经过反复试验，在龙溪口船闸混凝土的最优配合比在 70~90 mm 范围内确定坍落度。

表 1 龙溪口船闸和其他船闸不同混凝土材料配合比

混凝土强度等级	船闸	水泥	粉煤灰	河砂	人工砂	小石		中石		大石		水	减水剂	$\text{kg}/\text{m}^3$
						5~20 mm	20~40 mm	40~80 mm						
C20	龙溪口	136	74	164	383	410	493	739	109	2.31				
	其他	166	71	346	149	331	580	745	128	4.27				
	差值	-30	3	-182	234	79	-87	-6	-19	-1.96				
C25	龙溪口	151	81	156	364	412	494	740	109	2.55				
	其他	183	78	328	140	332	580	746	128	4.70				
	差值	-32	3	-172	224	80	-86	-6	-19	-2.15				

混凝土各项原料优化: 1) 粗骨料采用混合振动密实法进行试验, 调选合理掺配比例, 达到骨料的空隙率最小, 降低混凝土单方用水量, 减少水化热; 2) 细骨料采用人工砂和天然砂混合掺配, 试验数据综合对比最佳的细度系数, 在减少胶凝材料和单方用水量的前提下保证混凝土的和易性, 增加混凝土强度; 3) 为大幅度优化混凝土的减水率、凝结时间、坍落度损失、含气量等指标, 寻求减水剂技术人员的现场指导, 减少减水剂用量; 4) 采用流动性较低的混凝土, 降低混凝土的坍落度, 减少水的用量, 降低水的热量, 提高混凝土的抗裂性能。

## 2.2 浇筑前温度控制

对原料进行相应的物理降温以降低混凝土浇筑料的初始温度, 包括对原材料存料罐/仓全部加设遮阳设施减少日晒吸热的方法, 同时罐体顶部及外壁、拌和站场内设置自动喷雾系统进行喷淋降温; 浇筑前设置雾炮机、仓前湿润及埋设冷却水管等措施; 浇筑前实时坍落度检测也可确保混凝土质量, 保证各项指标符合设计标准。现场实际应用见图 1。



a) 原材料降溫



b) 仓面处理



c) 坍落度检测

图 1 混凝土浇筑前温度控制

## 2.3 浇筑过程中温度控制措施

根据仓面大小合理规划混凝土分层分块(图 2)、浇筑顺序、覆盖时间、振捣机具、振捣人员; 浇筑后采用土工布覆盖、洒水保湿养护, 冷却水管通水降温。



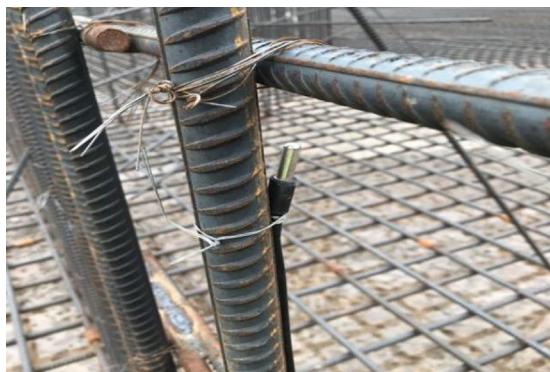
图 2 混凝土分层浇筑

## 3 温度监测

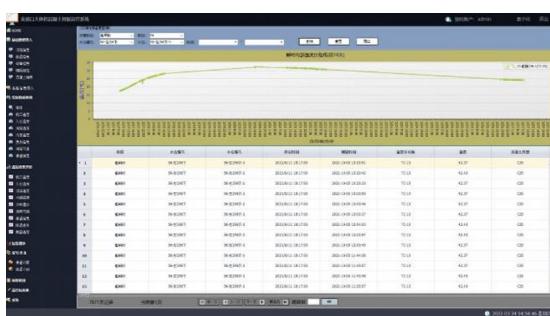
### 3.1 自动化温度控制与监测

在船闸闸首、闸室及泄洪闸底板等重点部位埋设温度传感器, 监测养护期内部实时温度, 并进行数据收集, 根据数据实时调节温度、冷却水管通水流量及速率, 提高工艺自动化水平。

通过实时监控混凝土芯部最高温度及内表温差数据并利用有限元模拟计算进行数据分析。布设冷却水管进行通水冷却, 控制混凝土外部温度与混凝土内部温度之差不超过 25 ℃, 混凝土降温速度每天不大于 2 ℃, 防止裂缝出现, 见图 3。



a) 测温探头埋设



b) 智能温度监测系统



c) 通水自动监测仪器



d) 冷却水管铺设

图 3 自动化温度控制与监测

### 3.2 监测数据分析

闸首底板混凝土浇筑尺寸为  $30.0\text{ m} \times 18.0\text{ m} \times 3.0\text{ m}$ (长×宽×高)，在上闸首底板混凝土内部埋设 5 个温度传感器进行混凝土浇筑后的实时温度监测，混凝土内温度传感器布置见图 4。

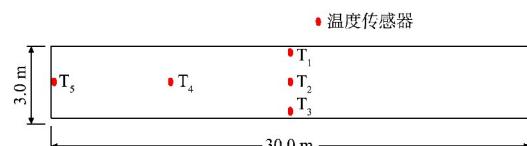


图 4 上闸首底板混凝土温度传感器布置

闸首底板混凝土中心  $T_2$ 、 $T_4$  温度的发展趋势见图 5。由图可知：1) 中心  $T_2$  温度在 20 h 时达到最高，为  $37.4^{\circ}\text{C}$ ，23 h 后开始降温，在 167 h 后降低至  $31.4^{\circ}\text{C}$ ；2) 中心  $T_4$  温度在 26 h 时达到最高，为  $36.1^{\circ}\text{C}$ ，27 h 后开始降温，167 h 后降低至  $30.3^{\circ}\text{C}$ ；3) 监测期间环境温度为  $18.4 \sim 35.4^{\circ}\text{C}$ 。

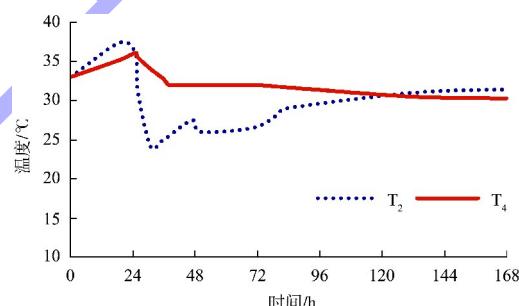


图 5 闸首底板混凝土中心温度发展趋势

闸首底板混凝土中心温度与表面温度随时间变化曲线见图 6。由图可知：1) 上表面  $T_1$  在 19 h 时达到最大值，为  $34.3^{\circ}\text{C}$ ；2) 下表面  $T_3$  在 19 h 时达到最大值，为  $33.9^{\circ}\text{C}$ ；3) 侧表面  $T_5$  在 8 h 时达到最大值，为  $36.0^{\circ}\text{C}$ 。

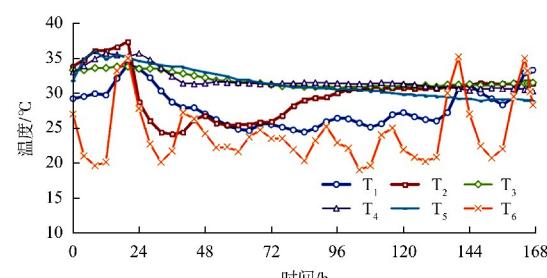


图 6 闸首底板混凝土中心温度与表面温度随时间变化曲线

闸首底板混凝土内表温差随时间变化曲线见图 7。由图可知: 1) 内表温差  $T_2-T_1$  在 13 h 时达到最大值, 为  $6.5^{\circ}\text{C}$ ; 2) 内表温差  $T_2-T_3$  在 32 h 时达到最大值, 为  $9.3^{\circ}\text{C}$ ; 3) 内表温差  $T_2-T_5$  在 35 h 时达到最大值, 为  $9.8^{\circ}\text{C}$ 。

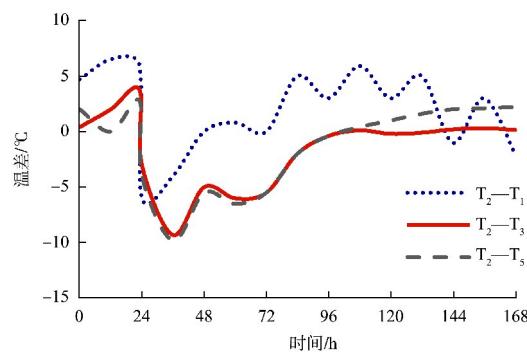


图 7 闸首底板混凝土内表温差随时间变化曲线

### 3.3 监测结果分析

根据船闸典型段混凝土实时温度监测结果, 统计混凝土构件温度场的温峰及内表温差情况见表 2, 混凝土构件应变情况见表 3。

表 2 闸首、闸室典型段混凝土浇筑后温度场情况

工程部位	入模温度/℃	温峰时间/h	温峰/℃	内表温差/℃	环境温度/℃	
闸首	28.3	20	37.4	9.8(35 h)	18.4~35.4	
	17.8	88	33.6	18.4(310 h)	9.2~22.1	
1#	27.8	19	41.2	10.8(18 h)	21.2~36.2	
2#	28.3	61	41.4	9.6(6 h)	20.6~36.2	
闸室	3#	27.6	43	40.2	10.4(82 h)	23.5~31.3
5#	18.4	75	33.7	16.4(I13 h)	9.2~22.1	
7#	18.4	49	32.1	14.6(104 h)	9.2~22.1	

表 3 船闸混凝土浇筑后应变监测结果

工程部位	传感器位置	最大应变 $\varepsilon/10^{-6}$	开裂风险
闸首边墩	底部侧表面	+199.7	较大
	中部侧表面	+199.6	较大
	中部中心	-82.6	较小
闸室墙 5#	底部侧表面	-343.0	较小
	底部中心	-206.8	较小
	中部中心	-157.6	较小
闸室墙 7#	底部中心	-168.6	较小
	中部侧表面	+48.4	较小
	中部中心	-122.7	较小

注: 拉为“+”, 压为“-”。

通过表 2 中各典型段的温度监测结果可知, 混凝土出现温峰的时间在 19~75 h, 峰值在  $32.1\sim41.4^{\circ}\text{C}$ , 内表温差在  $9.6\sim16.4^{\circ}\text{C}$ , 船闸各典型段混凝土内部温峰及各部位内表温差均小于大体积混凝土控裂指标要求。

通过表 3 各部位应变监测结果可知, 混凝土侧表面受环境及养护的影响较大, 存在拉应变, 最大值为  $199.7 \times 10^{-6}$ ; 其他监测部位为压应力, 最大值为  $343 \times 10^{-6}$ , 压应变使混凝土出现裂缝的可能性较小。

### 4 控裂措施效果评价

通过分析已浇筑混凝土的温度资料与现有温控措施的关系, 对控裂措施进行效果评价, 指导后续大体积混凝土防裂。

1) 配制低热低收缩混凝土。使用低热水泥, 使得混凝土整体温升值较小, 夏季混凝土内部最高温度不超过  $45^{\circ}\text{C}$ , 极大减少了降温带来的收缩影响。浇筑时同步成型的 C20 混凝土干缩试块, 在 28 d 内的最大干缩率为: 等养值  $228 \times 10^{-6}$ , 标养值  $182 \times 10^{-6}$ 。船闸混凝土在充分保湿养护的情况下, 28 d 收缩率在  $250 \times 10^{-6}$  以内, 后续呈缓慢增长趋势, 无论是温峰或收缩情况均对混凝土控裂有利。

2) 温度控制。采取原材料降温措施控制混凝土出机温度, 入模温度控制在  $17.8\sim28.3^{\circ}\text{C}$ , 满足设计入模温度要求; 通过对混凝土配合比优化和冷却水管通水降温措施应用, 浇筑后混凝土温峰在  $32.1\sim41.4^{\circ}\text{C}$ , 内表温差在  $9.6\sim16.4^{\circ}\text{C}$ , 均远低于温控指标的要求, 未产生可见温度裂缝。

### 5 结论

1) 通过与同类型工程项目混凝土配合比参数对比, 在反复试验后得出适用于本项目的混凝土最优配比, 配制的低热低收缩混凝土 28 d 收缩率在  $250 \times 10^{-6}$  以内, 后续呈缓慢增长趋势, 对混凝土控裂有利。

(下转第 114 页)