



# 小溪滩船闸混凝土结构裂缝控制技术

范洪浩<sup>1,2</sup>, 邓春林<sup>3</sup>, 余春辉<sup>1,2</sup>, 郑星伟<sup>2,4</sup>, 张琴飞<sup>2,4</sup>

(1. 衢州市港航管理局, 浙江 衢州 324000; 2. 衢州市衢江航运开发工程建设指挥部, 浙江 衢州 324000;  
3. 中交四航工程研究院有限公司, 广东 广州 510230; 4. 衢州市巨江航运建设开发有限公司, 浙江 衢州 324000)

**摘要:** 船闸工程底板、闸室墙、输水廊道顶面和侧面、门槛顶面和侧面等部位极易出现贯穿性的规则裂缝。通过理论分析和现场实践, 从设计、材料、施工3个层次提出了船闸混凝土裂缝控制方法, 主要包括调整构造钢筋直径和钢筋间距、设置施工宽缝、调整冷却水管、优化混凝土配合比、采用全断面浇筑工艺、控制分层浇筑时间间隔等措施, 取得了较好的控制效果。

**关键词:** 船闸; 裂缝; 设计; 材料; 施工

中图分类号: U 641; TU 37

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2017)02-0110-05

## Cracks control technology of concrete structures for Xiaoxitan lock

FAN Hong-hao<sup>1,2</sup>, DENG Chun-lin<sup>3</sup>, YU Chun-hui<sup>1,2</sup>, ZHENG Xing-wei<sup>2,4</sup>, ZHANG Qin-fei<sup>2,4</sup>

(1. Quzhou Port and Waterway Management Bureau, Quzhou 324000, China;

2. Qujiang Shipping Development Project Construction Headquarters of Quzhou, Quzhou 324000, China;

3. CCCC Fourth Harbor Engineering Institute Co., Ltd., Guangzhou 510230, China;

4. Quzhou Giant River Shipping Development Co., Ltd., Quzhou 324000, China)

**Abstract:** Concrete cracks are likely to occur at floor, chamber wall, top and side wall of water delivery gallery, top and side surface of the threshold and other parts of the lock. Through theoretical analysis and field practices, the design, materials, construction methods are proposed, including adjustment of rebar diameter and rebar spacing, setting wind construction joints, adjustment of the cooling water pipes, optimization of concrete mix, using whole section pouring process, control the layered pouring interval. The good effect is obtained.

**Keywords:** lock; crack; design; material; construction

根据《钱塘江流域综合规划》和《衢江航运规划》, 对衢江自衢州双港口至兰溪长 80 km 航道按内河(渠化河流)IV 级航道标准进行整治, 同步建设塔底、安仁铺、红船豆、小溪滩、游埠和姚家共 6 个梯级枢纽, 达到衢江全线通航 500 吨级船舶的目标<sup>[1]</sup>。

衢江河段衢州境内规划建设的枢纽共有 4 座, 自上而下分别为塔底、安仁铺、红船豆、小溪滩枢纽。船闸由闸首、闸室、输水系统、闸门、阀门、引航道等以及相应的设备组成。小溪滩船闸和红船豆船闸的构造基本一致, 上闸首长 36.0 m、

宽 42.0 m; 闸室结构长 240 m、宽 23 m; 下闸首长 29.0 m、宽 42.0 m; 船闸底板厚度为 2.5~3.0 m, 属于大体积混凝土构件。

船闸输水廊道是船闸土建工程最重要的组成部分, 断面结构十分复杂, 体积较大, 是典型的异型大体积混凝土结构。根据以往建设经验, 船闸结构的廊道断面变化段、闸首底板、闸室底板等大体积混凝土构件易产生不同程度的各种裂缝, 且数量较多, 裂缝问题是船闸工程建设中主要的质量通病之一。已有文献<sup>[2-9]</sup>从不同角度对混凝土裂缝机理、控制方法进行了阐述, 但船闸裂缝问

收稿日期: 2016-05-27

作者简介: 范洪浩(1981—), 男, 高级工程师, 从事内河航运开发建设管理工作。

题依然突出, 红船豆船闸的底板、闸室墙、输水廊道顶面、门槛顶面和侧面等部位出现了一定数量的裂缝。

本文在总结前期工程经验的基础上, 从设计、材料、施工工艺优化等方面提出了系统、合理的小溪滩船闸裂缝控制措施, 取得了很好的控裂效果。

### 1 设计优化措施

结构设计对混凝土结构的抗裂作用往往被人们忽视, 这使得很多结构存在先天缺陷, 仅仅依靠材料、施工方面进行混凝土结构控裂, 不仅技术难度大、费用高昂, 其最终的效果也常常不尽如人意。设计优化措施包括优化构造配筋、合理分缝、优化冷却水管等。

#### 1.1 优化构造配筋

配筋对混凝土极限拉伸的影响用前苏联学者齐斯克列里经验公式<sup>[10]</sup>:

$$\varepsilon_{pa} = 0.5R_f \left( 1 + \frac{p}{d} \right) \times 10^{-4} \quad (1)$$

式中:  $\varepsilon_{pa}$  为配筋后混凝土的极限拉伸相对变形;  $R_f$  为混凝土标准抗拉强度 (MPa);  $p$  为截面配筋率,  $\frac{100 \times A_s}{A_c}$ ;  $d$  为钢筋直径 (mm)。

该公式认为提高配筋率、降低钢筋直径可以提高混凝土的极限拉应变值, 从而降低混凝土的开裂风险。在满足结构受力的前提下, 通过改变构造钢筋的配筋率、直径、间距、叠放层次等提高钢筋对裂缝的控制能力。

红船豆船闸裂缝分布规律性较强, 表 1 是红船豆船闸开裂较严重部位的裂缝走向、外层钢筋方向、外层钢筋直径、间距等参数。

表 1 红船豆船闸裂缝、配筋分析

位置	具体部位	裂缝方向	外层钢筋方向	外层钢筋直径、间距/mm
	廊道顶部	垂直水流	垂直水流	$\phi 25 @ 200$
上闸首	门坎顶面	纵向、横向	纵向	$\phi 14 @ 200$
	门坎上、下游立面	竖向	竖向	$\phi 14 @ 200$
闸室	底板顶面	纵向、横向	纵向	$\phi 25 @ 200$
	闸墙立面	竖向	水平	$\phi 25 @ 200$

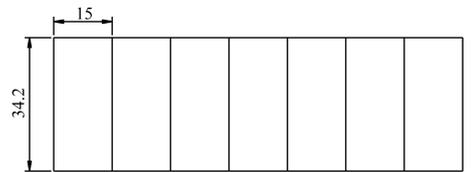
注: 纵向为船闸轴线方向, 横向为垂直于船闸轴线方向。

红船豆船闸门槛上、下游立面裂缝方向为竖向, 外层钢筋也是竖向, 配筋形式对结构控裂不利。

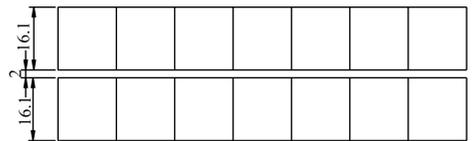
在总结红船豆船闸出现问题的基础上, 结合式(1), 提出小溪滩船闸的构造钢筋优化措施: 上下闸首输水廊道顶部平行水流方向的钢筋直径由 18 mm 调整为 16 mm, 间距由 200 mm 调整为 150 mm; 输水廊道侧面水平钢筋直径由 18 mm 调整为 16 mm, 间距由 200 mm 调整为 150 mm; 闸室墙水平钢筋直径由 25 mm 调整为 22 mm, 间距由 200 mm 调整为 150 mm。

#### 1.2 合理分缝

合理分缝能有效降低混凝土内部拉应力、控制混凝土裂缝。红船豆船闸和小溪滩船闸闸室底板尺寸均为 240 m × 34.2 m, 红船豆船闸沿船闸轴线方向每 15 m 设置一道伸缩缝, 底板分成 16 块, 每块尺寸为 15 m × 34.2 m, 单块长度过长导致了底板产生了较多平行于船闸轴线方向的裂缝。小溪滩船闸沿船闸轴线方向在底板中间增设一条宽 2 m 的施工宽缝, 原来的 15 m 设 1 条施工缝方案不变, 相当于底板分成了 32 块, 每块尺寸为 15 m × 16.1 m。优化前后的分缝见图 1, 优化后底板混凝土裂缝得到了很好的控制。



a) 红船豆船闸闸室底板分块



b) 小溪滩船闸闸室底板分块

图 1 底板分缝 (单位: m)

#### 1.3 优化底板冷却水管

小溪滩船闸闸室底板厚度为 2.5 m, 标准段纵向长度为 15 m、横向长度为 16.1 m, 闸室底板设计了 2 层冷却水管, 第 1 层距底部 0.6 m, 第 2 层

距底部 1.9 m，水管直径为 2.7 cm，间距为 1.3 m。

根据实际监测所获得的混凝土参数<sup>[11]</sup>，采用 Midas 有限元分析软件对底板温度应力进行模拟，假定混凝土浇筑温度为 30 ℃，模拟无冷却水管、原设计冷却水管、改进冷却水管 3 种条件下混凝土内部的温升情况。

无冷却水管时，底板中部剖面上浇筑 10 d 后温度分布见图 2。中心点最高温度达到 69 ℃，浇筑 10、20、30 d 后中心点温度分别为 57.2、44.9、38.2 ℃。

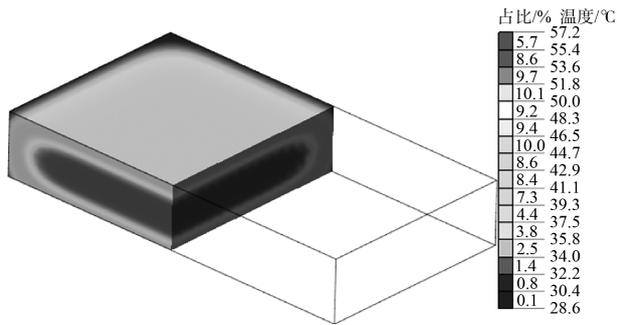


图 2 无冷却水管浇筑 10 d 后的温度分布云图

采用原设计冷却水管方案进行计算，中心点最高温度达到 68 ℃，最高温度仅比无冷却水管时降低 1 ℃左右，浇筑 10、20、30 d 后中心点温度分别为 51.2、37.6、31.8 ℃。

一般来说，冷却水管仅能对周围 30~50 cm 范围内的混凝土起到降温作用。底板上表面与空气对流较好，根据图 2 的计算结果，在没有设置冷却水管的情况下，表面 70 cm 混凝土的温度较低。综合以上分析，由于中心温度不能得到有效降低，将上层冷却水管的位置下移 30 cm，底层冷却水管的位置保持不变，两层冷却水管的间距由 1.3 m

调整为 1 m。冷却水管调整后进行有限元分析计算，中心点在 0~720 h 内的温度变化见图 3。中心点最高温度为 67 ℃，最高温度仅降低 2 ℃左右，浇筑 10、20、30 d 后中心点温度分别为 47.9、35.2、30.2 ℃。设置冷却水管后，虽然中心点最高温度仅降低 2 ℃，但浇筑 10 d 后中心点的降温达到 10 ℃，能够有效降低早期的温度裂缝。

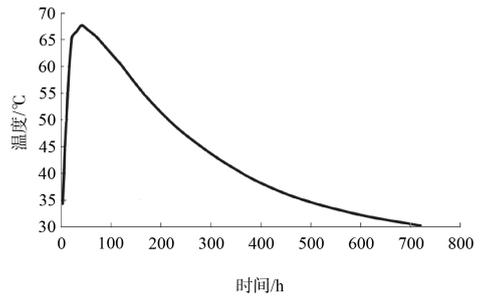


图 3 改进冷却水管中心点 0~720 h 温度发展

通过调整顶层冷却水管的位置，在没有增加冷却水管总长度的情况下，有效降低了中心点最高温度和各个时间段的温差，有效控制了内表温差，充分发挥冷却水管的控制作用。

### 2 混凝土材料优化措施

混凝土质量与裂缝开展息息相关，混凝土的水化热温升、收缩量、抗拉强度等指标是影响混凝土抗裂能力的关键指标。施工前，进行了混凝土配合比的优化，降低了胶凝材料和水泥用量，每立方米混凝土减少水泥 38 kg，通过优化集料的颗粒级配、粒形，减少含泥量，将砂率降低至 33%，配制出了水化热较低、收缩较低的混凝土，提高了混凝土的抗裂能力，取得较好的控裂效果。表 2 是优化前后的混凝土配合比。

表 2 混凝土配合比优化

优化前后	混凝土等级	水泥量/(kg/m <sup>3</sup> )	粉煤灰/(kg/m <sup>3</sup> )	水胶比	砂率/%	集料粒径/mm	坍落度/mm
优化前	C25	278	70	0.44	36	二级配 5~31.5	50~70
优化后	C25	240	80	0.50	36	二级配 5~40	50~70

### 3 施工优化措施

#### 3.1 分层优化措施

下闸首底板被 2 条施工宽缝分割成 3 块，中间一块平面尺寸为 15.2 m×29 m，底板厚度为 3 m，底板上需要浇筑 1 m 高的门槛。最开始的施工工

艺是先浇筑 3 m 厚的底板，然后在底板上浇筑连接梁和门槛，见图 4a)。后期发现，连接梁和门槛上出现了较多规则裂缝。通过有限元模拟，分析分层浇筑与全断面浇筑的内约束应力和外约束应力，后期改用全断面浇筑，见图 4b)。

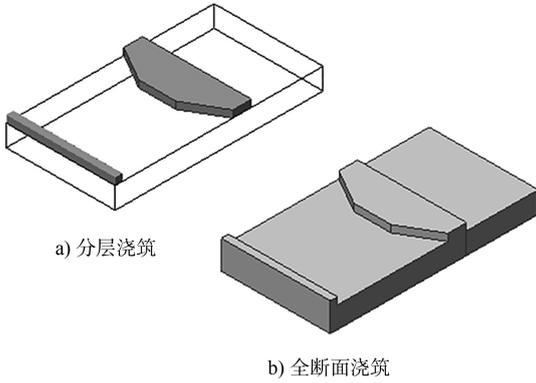


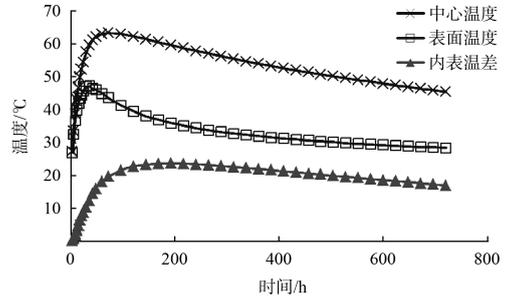
图 4 门檻施工顺序优化

通过有限元模拟软件分析两种工艺的混凝土中心温度、表面温度、内表温差, 见图 5。可以看出, 分层浇筑时的内表温差最大值为 23.8 °C, 全断面浇筑的内表温差为 25.6 °C, 根据各龄期的内表温差和中心温度, 按照《大体积混凝土施工规范》<sup>[12]</sup> 计算两种工况的自约束应力和外约束应力抗裂安全系数, 结果见表 3。

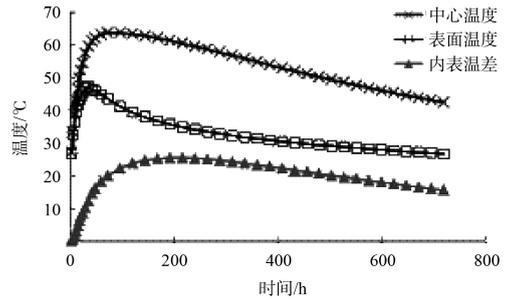
表 3 分层浇筑和全断面浇筑时的自约束和外约束抗裂安全系数

方式	基础阻尼系数 $C_x / (\text{MPa}/\text{mm})$	分段长度 $L/\text{m}$	分层高度 $H/\text{m}$	7 d 自约束 应力/MPa	30 d 外约束 应力/MPa	自约束应力 抗裂安全系数	外约束应力 抗裂安全系数
分层浇筑	1.5	15.2	1	1.17	2.81	1.34	0.63
全断面浇筑	0.3	29	4	1.28	0.99	1.22	1.80

通过计算, 在分层浇筑工艺情况下, 门檻自约束应力抗裂安全系数较大, 满足规范要求的大于 1.15, 但是外约束应力抗裂安全系数仅为 0.63, 门檻产生贯穿性的外约束应力裂缝的风险非常大。实际工程, 红船豆船闸的门檻在浇筑 1 个月左右出现了大量贯穿裂缝。全断面浇筑工艺情况下, 虽然混凝土的内表温差增大了, 但是自约束应力的抗裂安全系数依然满足规范要求, 且由于基础阻尼系数大幅降低, 外约束应力抗裂安全系数达到 1.80, 结构抗开裂的性能较强。在小溪滩船闸施工中, 门檻改为全断面浇筑, 见图 4b), 很好地控制了混凝土裂缝, 门檻已浇筑 5 个月, 尚未发现裂缝。分层浇筑的红船豆船闸混凝土裂缝见图 6, 改用全断面浇筑的小溪滩船闸门檻未发现任何裂缝, 见图 7。



a) 分层浇筑



b) 全断面浇筑

图 5 中心温度、表面温度及内表温差



图 6 红船豆船闸门坎混凝土裂缝



图 7 小溪滩船闸门坎浇筑后未见任何裂缝

### 3.2 分层浇筑时间间隔控制

很多工程因为分层浇筑时间间隔太长，底层混凝土约束导致上层混凝土出现贯穿性裂缝。船闸闸室施工过程中，从施工方便角度考虑，往往是一层一层地浇筑闸墙，不同层之间的浇筑间隔达到1个月甚至几个月，导致闸墙出现了较多竖向约束裂缝。后期改用分块浇筑，每段闸室先浇筑底板、再分层浇筑闸墙，直到整段闸墙都浇筑完成后再进行下一段闸墙的浇筑，把分层间隔时间控制在10 d左右，满足《船闸工程施工规范》<sup>[13]</sup>的规定，有效控制了闸墙混凝土裂缝，见图8。



图8 小溪滩船闸闸墙施工效果

### 4 结语

- 1) 船闸工程的裂缝控制涉及到设计、材料、施工等方面。通过调整构造钢筋直径和钢筋间距、设置施工宽缝、调整冷却水管、优化混凝土配合比、减少水平施工缝、控制分层浇筑时间间隔等措施，有效控制了船闸混凝土裂缝。
- 2) 有条件的情况下，采用全断面浇筑工艺，尽量减少水平分层，往往能显著降低外约束应力，较好地控制外约束应力裂缝。

### 参考文献:

- [1] 浙江省交通规划设计研究院. 钱塘江中上游衢江(衢州段)航运开发工程安仁铺枢纽及船闸施工图设计[R]. 杭州: 浙江省交通规划设计研究院, 2012.
- [2] 杨宗立, 徐长义, 陈俊波. 三峡工程永久船闸混凝土施工及质量控制[J]. 水力发电, 2000(6): 34-37.
- [3] 杨本新, 李江鹰. 葛洲坝1号船闸混凝土裂缝成因及加固研究[J]. 人民长江, 2003, 34(2): 29-31.
- [4] 马青春. 三峡船闸混凝土施工的几项重点技术[J]. 水利水电技术, 2004, 35(7): 5-8.
- [5] 朱平. 船闸工程闸室侧墙裂缝分析与处理[J]. 水运工程, 2006(8): 116-119.
- [6] 张倩. 邵伯三线船闸闸室墙倒角裂缝原因分析及防治[J]. 水运工程, 2011(4): 136-139.
- [7] 辛彦青, 李振声, 刘春俊. 船闸混凝土温度裂缝的经验教训[J]. 水运工程, 2002(8): 78-80.
- [8] 聂霞. 京杭运河谏壁二线船闸闸室墙防裂措施试验研究[J]. 中国港湾建设, 2002(2): 19-23.
- [9] 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.
- [10] 王铁梦. 工程结构裂缝控制“抗与放”的设计原则及其在“跳仓法”施工中的应用[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2006.
- [11] 邓春林, 范洪浩, 熊建波, 等. 基于实体监测的混凝土导热系数研究[J]. 水运工程, 2015(3): 132-135.
- [12] 中国冶金建筑协会. 大体积混凝土施工规范: GB 50496—2009[S]. 北京: 中国计划出版社, 2009.
- [13] 中交第二航务工程局有限公司. 船闸工程施工规范: JTS 218—2014[S]. 北京: 人民交通出版社, 2014.

(本文编辑 武亚庆)



## · 消 息 ·

### 京杭运河长沟船闸工程验收

近日，由中交水运规划设计院有限公司总承包的京杭运河长沟船闸工程通过交工验收。该工程在国内大型船闸建设中首次采用EPC工程总承包模式。

该工程是山东省“十二五”交通重点建设项目，是京杭运河“北延工程”的重要组成部分。项目的建成和使用，标志着京杭运河济宁至东平湖段全面复航，实现了京杭运河黄河以南段主航道与长江干线航道高等级无缝对接。  
[http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201701/t20170119\\_87363.html](http://en.ccccltd.cn/cccltd/news/jcxw/jx/201701/t20170119_87363.html) (2017-01-19)