



# 浮式系船柱槽浇筑力学性能分析<sup>\*</sup>

沈菊燕<sup>1,2</sup>, 周 灿<sup>3</sup>, 汪 宏<sup>4</sup>

- (1. 中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430000;  
2. 中交二航局第三工程有限公司, 江苏 镇江 212000;  
3. 湖南省水运建设投资集团有限公司, 湖南 长沙 410011;  
4. 江苏科技大学 船舶与海洋工程学院, 江苏 镇江 212000)

**摘要:** 针对船闸二期永久工程外露混凝土表面质量差的通病, 以浮式系船柱槽为研究对象, 研究了将混凝土浇筑工艺由二次改为一次的可行性。采用有限元软件对一次浇筑模板结构力学性能进行模拟分析, 同时与工程实例进行了比较。研究表明: 运用有限元软件模拟计算得出的力学性能计算值满足规范要求, 与实际结果吻合, 验证了一次浇筑的可行性。该方法成功应用于湘祁二线船闸, 可为类似船闸浮式系船柱槽的施工提供参考。

**关键词:** 浮式系船柱槽; 力学性能; 一次浇筑; 数值模拟分析

中图分类号: U 656

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2022)07-0211-06

## Mechanical properties of floating bollard groove during pouring

SHEN Ju-yan<sup>1,2</sup>, ZHOU Can<sup>3</sup>, WANG Hong<sup>4</sup>

(1. CCCC Second Harbor Engineering Co., Ltd., Wuhan 430000, China;

2. China Communications 2nd Navigational Bureau 3rd Engineering Co., Ltd., Zhenjiang 212000, China;

3. Hunan Provincial Water Transportation Construction & Investment Group Co., Ltd., Changsha 410011, China;

4. School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang 212000, China)

**Abstract:** To address the common problem of the poor apparent quality of exposed concrete in the second-phase permanent projects of ship locks, this study takes the floating bollard groove as the research object to investigate the feasibility of changing the concrete pouring process from two-time pouring to one-time pouring. Specifically, it simulates and analyzes the mechanical properties of the one-time pouring formwork structure with finite-element software and compares the results with those of engineering examples. This research shows that mechanical properties calculated through finite-element software simulation meet the specification requirements and are consistent with the actual results, which verifies the feasibility of one-time pouring. The proposed method has been successfully applied to the Xiangqi second-line ship lock, and it can provide a reference for the construction of similar floating bollard grooves of ship locks.

**Keywords:** floating bollard groove; mechanical property; one-time pouring; numerical simulation analysis

船闸水工建筑物中, 大体积混凝土二次浇筑施工方法发挥了极为重要的作用。该方法主要有

两个方面优势: 一是防止船闸整体式现浇混凝土结构因闸墙和墙后回填料自重引起底板产生裂缝,

收稿日期: 2021-12-04

<sup>\*</sup>基金项目: 江苏省教委自然科学基金项目(2016CH103J)

作者简介: 沈菊燕(1974—), 女, 高级工程师, 从事水运工程项目管理。

比如整体坞式结构船闸沿闸首纵轴线方向设置的施工宽缝、后浇带等；二是满足金属结构埋件安装精度要求，比如人字门的蘑菇头、支枕垫、浮式系船柱等埋件安装与浇筑。同时，二期混凝土浇筑施工方法也存在一些弊端：1)增加了混凝土浇筑的全套工艺流程，施工繁琐、质量管控难度大；2)在混凝土浇筑结合面易渗漏，模板加固不当容易产生错台、漏浆等质量问题；3)二次混凝土浇筑施工工期长、成本投入大等<sup>[1-5]</sup>。

结合湘江永州—衡阳Ⅲ级航道湘祁二线船闸工程，以闸室浮式系船柱导轨埋件为研究对象，针对传统的船闸结构分两期混凝土浇筑施工工艺中存在的问题，开展了相关调查研究。根据三峡永久船闸相关文献<sup>[6]</sup>在浮式系船柱一次安装工艺方面的研究，三峡船闸闸室墙为直立薄壁结构，与湘祁二线船闸的衡重式结构有明显区别，其加固方式并不适用本工程。针对相关问题，文献[7]首次提出衡重式结构船闸浮式系船柱一次浇筑施工工艺；文献[8-10]分析一次浇筑工艺模板结构力学性能，同时对一次浇筑工艺与二次浇筑工艺施工效果进行了经济性比较，确定了一次浇筑工艺的可行性。

1 工程概况

湖南湘江永州—衡阳Ⅲ级航道工程湘祁二线船闸为 1 000 吨级船闸，船闸闸室有效尺度为 180 m×23 m×4 m。闸室共布置 16 个浮式系船柱，间距 19~23 m。浮式系船柱设计荷载为 1 000 吨级、兼顾 2 000 吨级的内河货船系缆力，设计系缆力为 150 kN，其结构由浮筒、上层系船架、滚动装置及预埋件组成，浮筒、上层系船架采用钢结构焊接制作。滚动装置由横向、纵向各 6 个滚轮组成，滚轮在闸墙导槽内随水位升降而上下滚动。布置 2 层系船柱，层距 1 690 mm。导槽埋件主要由导轨、护角、底槛、连接角钢和限位装置组成，埋件材料材质 Q235B，导轨和护角对称布置，采用螺栓连接。

导槽混凝土强度为 C35，预留导槽尺寸 2.4 m×1.7 m×17.8 m。导槽为八边形结构，内嵌在闸室墙迎水面一侧，最大净空 1 700 mm，见图 1。

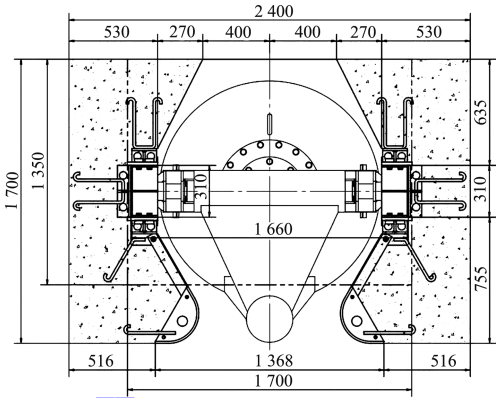


图 1 导槽结构（单位：mm）

2 浮式系船柱导轨导槽结构

传统浮式系船柱导轨导槽结构混凝土浇筑施工时，首先采用定型槽口模板（长 2.4 m，宽 1.7 m，高度与闸室墙混凝土分层高度一致）与闸室墙前沿迎水面模板相结合，预留后续导槽埋件安装加固插筋，待闸室墙第一次混凝土浇筑完成后，对槽口处进行凿毛处理，安装导槽埋件，再分层支立独立模板体系二次浇筑导槽混凝土。

由图 1 可知，浮式系船柱导轨由左右两侧各 3 组锚筋（即支撑筋）通过与预埋插筋焊接加固实现精准定位。原设计方案采取二次混凝土浇筑施工，预留插筋并进行二次安装；改为一次浇筑后，最大的区别在于浮式系船柱的导槽与闸室墙混凝土浇筑施工同步成型，由于没有预埋插筋的连接，整个支撑体系发生改变，须重新设计支撑定位。

通过研究力学性能，得出适合本工程的一次浇筑支撑定位方案总体思路为：设计一套可拆卸的异形模板，导轨作为异形模板的一部分，共同构成导轨-模板体系，见图 2；导轨安装高程以下设置 1 套钢支架，由 5 根长 1 500 mm 的 20 号工字钢组成，该钢支架预埋在下层闸室墙混凝土中作为导轨-模板体系的支座。

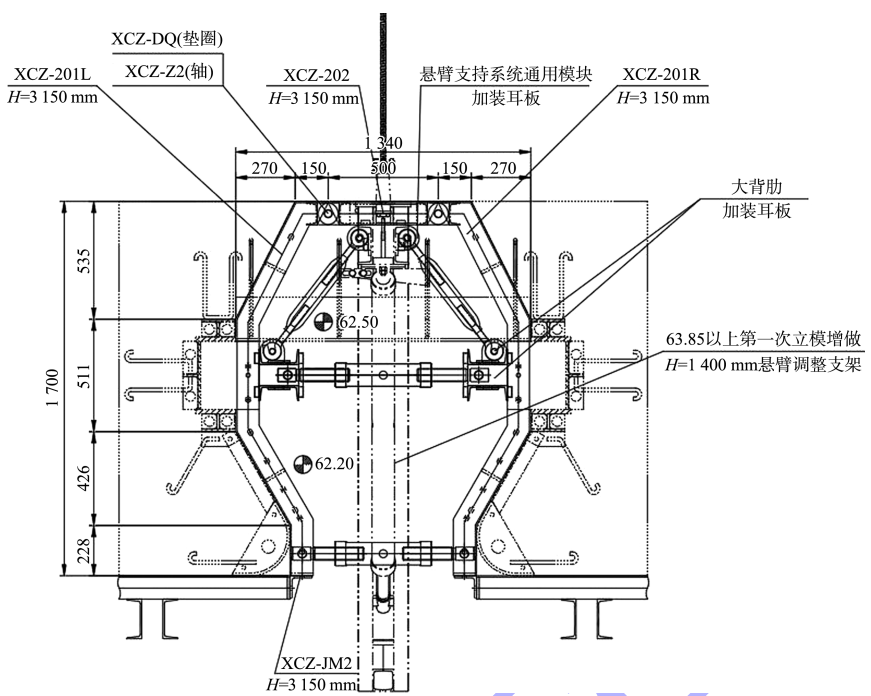


图 2 导轨-模板体系 (高程: m; 尺寸: mm)

3 导轨-导槽模板结构体系设计

导轨-模板体系的长度为 3 150 mm, 与闸室混凝土浇筑施工分层高度相适应。体系由 4 部分组成, 即导轨的定位装置、模板、悬臂支架和调节法兰螺栓。

模板由 1 块 500 mm×3 150 mm 的平板模和两块异形模组成; 为便于拆卸, 模板间采用铰链连接, 用法兰螺栓调整相邻两块模板角度, 用可调撑杆和悬臂支架进行支撑加固; 定位装置包括 4 个

M20 螺杆、2 块定位钢板, 并按设计位置在模板上配孔固定。导轨与模板定位方式为: 底部螺栓定位连接, 中部(局部间隙处)采用法兰螺栓将导轨拉紧并紧贴模板面, 顶部通过模板上部设置的定位钢板及法兰螺栓调整至安装位置。见图 3。拆模时先松开顶杆, 吊走定位装置; 然后拆除与相邻迎水面模板连接的角模; 最后拧动可调撑杆, 收缩模板。见图 4。



图 3 导轨-模板体系实物

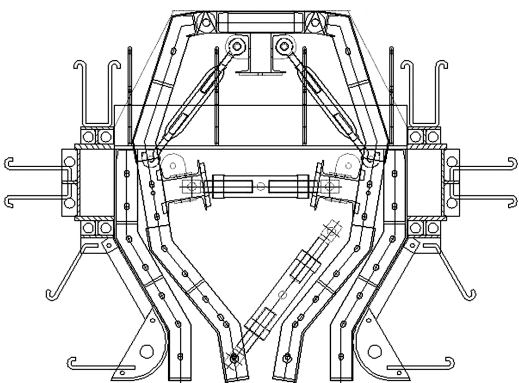


图 4 导轨-模板体系拆模示意

4 导轨-导槽模板结构力学性能分析

4.1 制约导轨-模板安装精度的因素

安装精度的总要求是：导槽结构各部分的形状、尺寸、内部空间和相对位置满足设计要求，浮式系船柱能够随着水面升降而自由上浮下降，行程不卡阻。制约导轨-模板安装精度的因素主要有 3 个方面：1) 导轨-模板体系的刚度、强度和稳定性；2) 导轨-模板的模数要求；3) 导轨-模板体系标准化、系列化，能否达到装拆方便、多次周转的目的。

4.2 数值模拟分析

根据浮式系船柱导轨一次浇筑支撑定位方案，混凝土浇筑施工时制约一次导轨安装精度的主要外部荷载包括：施工时人员及设备荷载、混凝土浇筑施工时的振捣震动、新浇筑混凝土施工的侧压力等。

4.2.1 建模

混凝土浇筑过程中，最不利工况为不对称卸料时吊罐碰撞、振捣棒振激、工作平台上人员和设备荷载均集中在导轨-模板体系的一侧，验算主要考虑如下荷载：

1) 混凝土浇筑施工时振捣对导轨-模板体系产生震动荷载，对于垂直安装的导轨，震动荷载采用 4 kN/m<sup>2</sup>，按照每仓混凝土浇筑高度 3 m 计算。

2) 新浇筑混凝土产生的侧压力，按公式 (1)<sup>[11]</sup> 进行计算

$$F=0.22\rho_cgt_0\beta_1\beta_2v^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中： $F$  为新浇筑混凝土对模板的最大侧压力 (kN/m<sup>2</sup>)； $\rho_c$  为混凝土的密度 (t/m<sup>3</sup>)； $t_0$  为新浇混凝土的初凝时间 (h)，按实测确定，当缺乏试验资料时可采用  $t_0=200/(T+15)$  计算， $T$  为混凝土的温度 (℃)； $\beta_1$  为外加剂影响修正系数，不掺外加剂时取 1.0，掺具有缓凝作用的外加剂时取 1.2； $\beta_2$  为混凝土坍落度影响修正系数，当坍落度小于 30 mm 时，取 0.85，坍落度为 50~90 mm 时，取 1.00，坍落度为 110~150 mm 时，取 1.15； $v$  为混

凝土浇筑高度 (厚度) 与浇筑时间的比值，即浇筑速度 (m/h)； $H$  为混凝土侧压力计算位置处至新浇筑混凝土顶面的总高度 (m)，计算可得  $F=23.53$  kN/m<sup>2</sup>。

3) 考虑到实际采用容量为 2 m<sup>3</sup> 的吊罐入仓方式，混凝土浇筑施工卸料产生的水平冲击荷载取 8 kN/m<sup>2</sup>。

4) 施工人员及设备产生的影响取 2 kN/m<sup>2</sup>。

模板系统受力主要由可变荷载混凝土侧压力控制，根据 GB 50009—2012《建筑结构荷载规范》<sup>[12]</sup> 第 3.2.3 节可知，由可变荷载控制的效应设计值，应按下式进行计算：

$$S_d=\sum_{j=1}^m\gamma_{G_j}S_{G_{jk}}+\gamma_{Q_1}\gamma_{L_1}S_{Q_{1k}}+\sum_{i=2}^n\gamma_{Q_i}\gamma_{L_i}\psi_{C_i}S_{Q_{ik}} \quad (2)$$

式中： $\gamma_{G_j}$  为第  $j$  个永久荷载的分项系数； $\gamma_{Q_i}$  为第  $i$  个可变荷载的分项系数，其中  $\gamma_{Q_1}$  为主导可变荷载  $Q_1$  的分项系数； $\gamma_{L_i}$  为第  $i$  个可变荷载考虑设计使用年限的调整系数，其中  $\gamma_{L_1}$  为主导可变荷载  $Q_1$  考虑设计使用年限的调整系数； $S_{G_{jk}}$  为按第  $j$  个永久荷载标准值  $G_{fk}$  计算的荷载效应值； $S_{Q_{jk}}$  为按第  $i$  个可变荷载标准值  $Q_{ik}$  计算的荷载效应值，其中  $S_{Q_{1k}}$  为诸可变荷载效应中起控制作用者； $\psi_{C_i}$  为第  $i$  个可变荷载  $Q_i$  的组合值系数； $m$  为参与组合的永久荷载数； $n$  为参与组合的可变荷载数。取活载安全系数 1.4、恒载安全系数 1.2，则作用于模板表面的侧压力设计值为  $F=47.8$  kN/m<sup>2</sup>。

根据浮式系船柱结构尺寸，利用有限元软件建立三维模型<sup>[13-14]</sup>，见图 5。结构以 3 处竖向大背肋下口为固定支点 (悬臂支架连接处)，混凝土施工荷载施加于模板板面，简化后结构见图 6。为方便计算、增大安全系数，不考虑钢筋及轨道对模板结构的加固作用。建模中，钢材主要材料力学特性为：材料材质 Q235，抗拉、压、弯强度设计值  $f=215$  MPa，弹性模量 206 GPa，抗剪强度设计值  $f_v=125$  MPa。边界条件：在 3 个 [18 肩背肋上对拉孔及下销轴孔限制位移，中间的 2 个撑杆孔设置限制位移，模板边框孔限制位移。

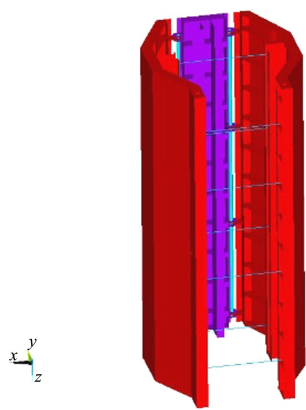


图 5 模板支撑系统三维模型

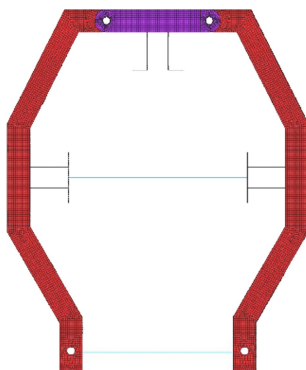


图 6 模板支撑系统三维简化模型

荷载布置：由于三维建模影响，没有按梯形力加载，偏于安全考虑全部按最大侧压力 47.8 kN/m<sup>2</sup> 垂直加载于模板面板上。

4.2.2 有限元结构分析计算结果

根据有限元结构分析计算得出最大荷载时的变形量为 3.659 mm，见图 7， $\leq L/400$  ( $= 7.875$  mm， $L$  为单节导轨-模板体系的长度，3 150 mm)，满足要求。施工最大荷载时对应的应力为 181.847 MPa ( $\leq 215$  MPa)，满足要求，见图 8。

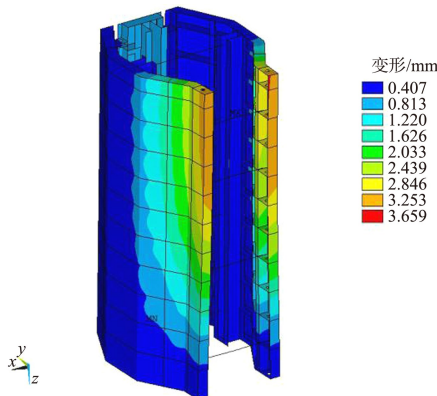


图 7 最大荷载时的变形量

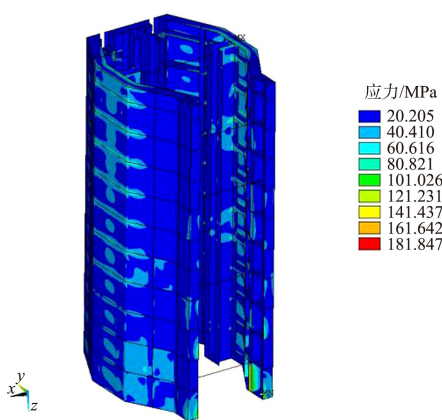


图 8 等效应力

模拟所得变形值与实测变形趋势大致一致，模板接缝及导槽处结构模拟应力值较大，符合实际施工状态，可知该有限元模型具有良好的适用性。模板系统在结构施工模拟分析时的结构总应力值、变形量满足要求，即结构强度、刚度都能满足规范及施工要求。

5 工程实例

湘祁二线船闸于 2020 年 2 月开始浮式系船柱混凝土浇筑施工，至 10 月浇筑完成。根据现场施工情况来看，一次浇筑的浮式系船柱导槽色泽均匀、整体性较好，但二次浇筑有较为明显的色差和竖向施工缝，见图 9。总体来看一次浇筑工艺混凝土质量及美观性都显著提高。

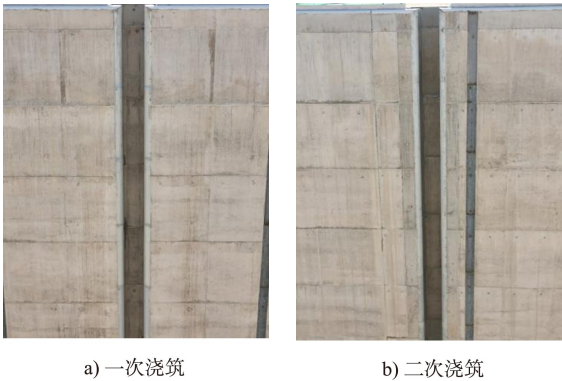


图 9 浮式系船柱导轨导槽混凝土外观

经检测，浮式系船柱导槽二次施工改一次浇筑有以下几方面优势：

1) 安装精度满足规范<sup>[15]</sup> 要求。经检测，导轨垂直度、导槽净孔尺寸等各项指标合格，检测结

果见表 1。一次安装加固不需拉结筋，墙面无孔洞，亦无需单独修补，避免了修补砂浆与原混凝土浇筑施工色差的问题，同时也不存在二次混凝土浇筑的施工缝，整体效果好。

表 1 浮式系船柱导槽及导轨安装检测结果

检测指标	允许偏差/mm	检测结果最大误差/mm	备注
导轨竖向倾斜	17.8(H/1 000)	16.0	测斜仪测量；H=17.8 m
相邻导轨错位	1.0	0.8	靠尺和塞尺测量
主滚轮、侧滚轮轴线平行偏差	0.5	0.4	吊线测量
导槽断面尺寸	10.0	8.0	钢尺测量
导槽竖向倾斜	20.0	10.0	吊线用钢尺测量

2)施工效率显著提高。一次浇筑减少二次混凝土施工的前期凿毛、清理及后期孔洞修补等工序，加快施工进度。

3)有效降低施工成本。工序减少，进而减少人工、机械设备及原材料的投入，缩短了工期。

表 2 浮式系船柱槽一次浇筑效益对比

项目	成本/(元·个 <sup>-1</sup> )							均摊研发费用/元	工期对比/d	综合效益/元
	模板支立	埋件安装	措施钢筋	二次凿毛	后期修补	吊车使用	泵车使用			
一次浇筑	0	1 050	0	0	0	0	0	1 343	0	37 707
二次施工	2 100	2 100	1 500	6 300	300	9 600	18 200	0	49	

4)施工安全性显著增加。采用一次浇筑工艺，无需在狭小空间内搭设高支架、加固模板等，提高了施工的安全性。

综合比较结果：相对二次浇筑工艺，一次浇筑浮式系船柱槽极大提高了浮式系船柱槽混凝土浇筑质量、加快了施工效率、有效降低了施工成本、增加了施工的安全性。

6 结语

1)通过分析安装精度影响因素及有限元模拟，验证了模板结构设计力学性能满足规范及施工要求、模型计算值与实测值相关性较好、导轨-模板体系变形形态以及计算误差非常小。

2)根据结构力学性能有限元分析及实测结果，验证了船闸工程浮式系船柱槽二次浇筑工艺改为一次浇筑工艺导轨-模板体系设计的合理性，同时验证其模板结构力学性能满足实际施工要求。

3)船闸工程浮式系船柱槽一次浇筑导轨-模板体系可有效解决支撑定位、模板拆卸周转等施工问题，满足设计、规范及施工等要求，对指导、

参考文献：

[1] 施劲.船闸工程混凝土外观缺陷质量通病防治[J].江西建材,2014(21): 135-136.

[2] 孔繁龙.船闸工程混凝土质量通病治理技术[J].中国水运(下半月), 2013, 13(4): 237-239.

[3] 倪前飞.浅谈江苏省泗阳二号船闸上游靠船墩施工控制要点[J].中国水运(下半月), 2011, 11( 12): 202+265.

[4] 谢几何,李进.船闸浮式系船柱门槽二期砼连续施工技术[J].今日科苑,2008( 18): 92-93.

[5] 张玉强,朱平.万年闸船闸浮式系船柱槽的施工[J].海岸工程,2004(3): 52-60.

[6] 谷湘.三峡永久船闸浮式系船柱导槽安装[J].水力发电,2001(3): 30-31, 58.

[7] 陈广明,尚龙.15 m 高船闸闸室墙一次成型施工关键技术[J].中国港湾建设,2021, 41( 10): 60-64.

[8] 卜星玮,彭真,任凯.船闸闸室输水廊道整体移动模板系统施工技术[J].中国港湾建设,2018, 38( 12): 48-51.

[9] 邵炜俊.钢模板安装与拆除技术在船闸工程建设中的应用[J].中国水运( 下半月), 2020, 20( 6): 126-127.