

· 航道及通航建筑物 ·



山区河流装配式船闸导航墙结构 设计与受力性能*

叶海鹏, 李泳龙, 吴礼国

(四川省交通勘察设计研究院有限公司, 四川 成都 610017)

摘要: 针对传统现浇船闸导航墙施工期水化热致裂风险高、工效低及湿作业污染重等问题, 研究了山区河流全装配式船闸导航墙结构与受力性能。采用层内高强螺栓连接与层间纵向锚筋连接的全预制装配方案, 建立了基于尺寸4 m×2 m×2.4 m模块化标准件的分层装配方法、层内螺栓抗剪机制及层间锚筋抗滑移机制设计方法。通过构建三维非线性有限元模型, 分析了运行高水位、运行低水位、完建工况和校核工况下的结构应力变形、接触状态和连接件性能。结果表明, 装配件间最大滑移量为1.07 mm, 螺栓最大主应力为215.30 MPa, 低于屈服强度300 MPa, 锚筋束局部屈服但结构整体性良好; 抗滑稳定安全系数为1.15~1.45, 满足规范限值。研究表明全装配式导航墙在山区河流船闸中具备良好的力学性能与工程适用性。

关键词: 船闸; 导航墙; 结构设计; 受力性能; 有限元分析

中图分类号: U641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2026)05-0085-08

Structural design and mechanical performance of assembled navigation wall for ship locks in mountainous rivers

YE Haipeng, LI Yonglong, WU Liguo

(Sichuan Transportation Survey and Design Institute Co., Ltd., Chengdu 610017, China)

Abstract: To address the problems of high cracking risk caused by hydration heat during construction, low construction efficiency, and serious pollution from wet operations associated with traditional cast-in-place navigation walls of ship locks, this paper investigates the structural design and mechanical performance of fully assembled navigation walls for ship locks in mountainous rivers. A fully prefabricated assembly scheme using high-strength bolts for intra-layer connections and longitudinal anchor bars for inter-layer connections is adopted. A layered assembly method based on 4 m×2 m×2.4 m modular standard components is established, together with design methods for the shear mechanism of intra-layer bolts and the anti-slip mechanism of inter-layer anchor bars. A three-dimensional nonlinear finite element model is developed to investigate the structural stress and deformation, contact state, and performance of connectors under operation at high water level, operation at low water level, completion condition, and check condition. Results show that the maximum slip between assemblies is 1.07 mm, and the maximum principal stress of bolts is 215.30 MPa, which is below the yield strength of 300 MPa. Local yielding occurs in anchor bar bundles, but the structural integrity is favorable. The anti-sliding stability safety factor ranges from 1.15 to 1.45, satisfying the code limits. The study indicates that fully prefabricated navigation walls possess good mechanical properties and engineering applicability in ship locks of mountainous rivers.

Keywords: ship lock; navigation wall; structural design; mechanical performance; finite element analysis

收稿日期: 2025-09-09 录用日期: 2025-10-17

*基金项目: 四川省交通勘察设计研究院有限公司资助科技项目(232022017)

作者简介: 叶海鹏(1998—), 男, 硕士, 助理工程师, 从事港口与航道工程设计工作。

山区河流船闸导航墙传统现浇施工存在水化热致裂风险高、施工效率低及湿作业污染严重等问题。国内外学者开展了装配式结构在水工建筑物中的应用研究。王锦迪等^[1]分析了内河智慧航道建设需求，指出提升施工效率与质量稳定是行业重点；张湛等^[2]研究了急弯河段船闸通航条件，得出结构可靠性与变形控制对通航安全至关重要；袁泉等^[3]探讨了船闸混凝土开裂成因，确认水化热是主因；陈旭等^[4]通过温控试验揭示了温度应力分布规律；王劼耘等^[5]验证了大体积混凝土质量控制技术。在装配式技术方面，阮复兴等^[6]报道了预制沉箱应用；陈秋声^[7]研究了大型船闸预制模板施工；白久林等^[8]开发的预应力连接结构、徐龙河等^[9]提出的摩擦节点性能研究，以及肖佳栋等^[10]、程蓓等^[11]对联肢剪力墙隔震结构的研究，为装配式连接提供了参考。然而，针对山区河流船闸全装配式结构体系的设计与系统受力性能研究仍不足。

本文提出“层内高强螺栓+层间纵向锚筋”全预制装配方案，建立模块化设计、螺栓抗剪与锚筋抗滑移机制，通过三维非线性有限元分析多工况下结构应力变形及稳定性，旨在为工程应用提供依据。

1 全装配式导航墙结构体系设计

1.1 结构分层装配机制与标准件设计

导航墙采用模块化分层装配体系，由标准化预制混凝土单元体与现浇底板协同构成。标准单元体为薄壁箱型结构(尺寸4 m×2 m×2.4 m，壁厚0.2 m)，内部填充弃土。典型右导墙由8层46个标准件按梯度分布装配(底层12件至顶层2件)，底层置于0.8 m厚C25混凝土底板上。装配导航墙典型结构段见图1。

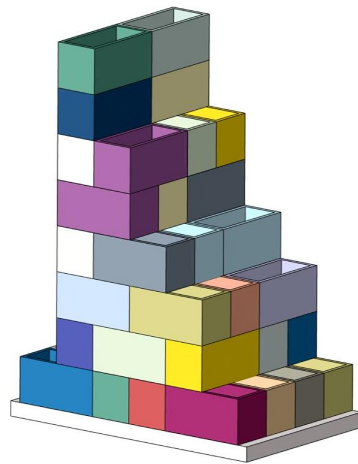


图1 装配式导航墙(右导墙)典型结构段
Fig.1 Typical structural segment of assembled navigation wall(right guide wall)

1.2 双重连接系统设计

采用层内螺栓抗剪与层间锚筋抗滑移双重连接机制。螺栓直径30 mm(屈服强度300 MPa)，全结构布设56组，针对小面-小面、大面-大面、小面-大面3类接触形式差异化配置安装位点，见图2。锚筋束由3×φ28 mm钢筋构成(总截面积1 847 mm²)，全结构配置96束沿高度梯度分布，植入凸榫结构后灌浆固结，见图3。

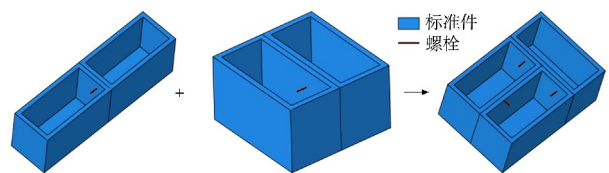


图2 螺栓安装方式
Fig.2 Bolt installation method

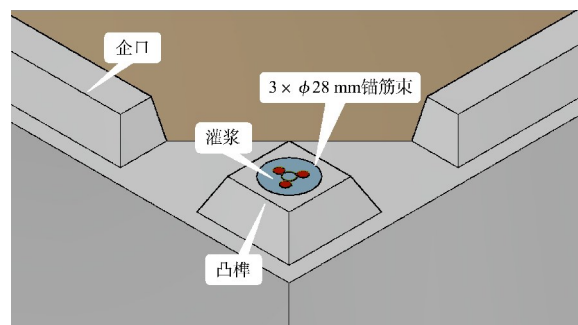


图3 锚筋安装方式
Fig.3 Anchor bar installation method

2 计算理论

2.1 接触摩擦理论

接触面力学行为采用库仑摩擦模型描述, 其核心为接触压力与临界剪应力的线性关系:

$$\tau_{\text{crit}} = \mu p \quad (1)$$

式中: τ_{crit} 为临界剪应力; μ 为摩擦系数; p 为接触压力。

参考类似工程研究^[12], 采用硬接触模型并设置接触面摩擦系数(标准件间 $\mu=0.6$, 底板-地基间 $\mu=0.4$), 以兼顾计算效率与模拟精度。硬接触模型的特征为: 当接触间隙 $h \leq 0$ (贴合或嵌入) 时, p 随嵌入深度线性增长; 当 $h > 0$ (间隙张开) 时, p 瞬间降为 0, 模拟刚性接触的突变响应, 见图 4a)。软接触模型采用指数函数, $p = \frac{p_0}{e-1} h_c (e^{h_c} - 1)$, 其中 $h_c = h/c - 1$, 虽能实现张开-闭合的光滑过渡, 但依赖初始接触间距 c (经验参数) 和参考压力 p_0 , 见图 4b), 且非线性特性易导致计算收敛困难。通过力学响应曲线对比, 明确选择硬接触模型结合库仑定律作为模拟方案。

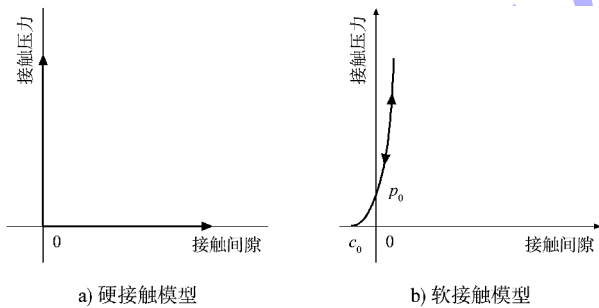


图 4 缝面法向行为模型

Fig. 4 Normal behavior model of joint surface

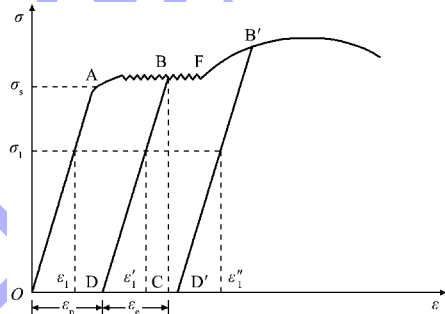
2.2 材料非线性模型

螺栓与锚筋等金属材料的力学行为采用弹塑性本构模型描述。通过单向拉伸试验可获得典型应力-应变曲线, 见图 5。其弹性阶段满足 $\sigma_s = E_s \varepsilon_s$, 塑性阶段呈现强化特性。为简化分析, 采用 GB/T 50010—2010《混凝土结构设计规范》推荐的二折线模型, 见图 6。数学表达式为:

$$\sigma_s = \begin{cases} E_s \varepsilon_s & (\varepsilon_s \leq \varepsilon_y) \\ f_y & (\varepsilon_s > \varepsilon_y) \end{cases} \quad (2)$$

式中: σ_s 为钢筋的应力; E_s 为钢筋弹性模量, 为 210 GPa; f_y 为钢筋屈服强度, 为 300 MPa; ε_s 为钢筋应变; $\varepsilon_y = f_y/E_s$ 为屈服应变, 纵向钢筋的极限拉应变取 0.01。

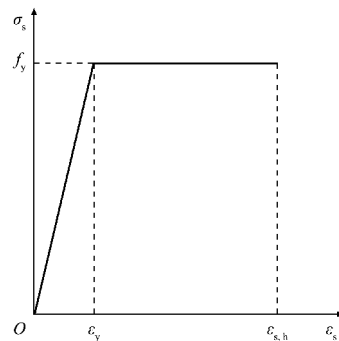
基于该模型, 锚筋量化设计聚焦抗拉强度控制与空间梯度分布, 全结构配置 96 束锚筋(每束 $3 \times \phi 28$ mm, 总截面积为 $1\ 847$ mm²), 沿高度梯度递减布置(顶层 12 束至底层 2 束), 布设密度与层间剪力分布正相关。设计准则为确保锚筋应力满足 $\sigma_s < 265$ MPa $< f_y$, 始终处于弹性阶段, 并通过纵向通长布置优化弯矩分配效率。螺栓同样采用二折线模型, 直径 30 mm, 屈服强度 300 MPa。



注: σ_1 为某一参考应力; σ_s 为屈服阶段的特征应力; ε_p 为塑性应变; ε_e 为弹性应变; ε_1 为与 σ_1 对应的总应变; ε'_1 、 ε''_1 为不同加载循环中对应同一应力 σ_1 的总应变。

图 5 简单拉伸时应力-应变曲线

Fig. 5 Stress-strain curve under uniaxial tension



注: $\varepsilon_{s,h}$ 为钢筋硬化起点应变。

图 6 钢筋应力与应变关系二折线模型

Fig. 6 Bilinear model of stress-strain relationship for reinforcing steel

2.3 抗滑稳定安全系数计算

抗滑稳定安全系数 K_s 采用应力代数和比值法计算, 该方法广泛应用于我国工程实践。沿接触

面分段(长度 l_i), 计算各分段正应力 σ_{ni} 和剪应力 τ_{ni} 。若不考虑胶结作用, 则抗滑力为 $\sum f_i \sigma_{ni} l_i$, 滑动力为 $\sum \tau_{ni} l_i$, 安全系数定义为:

$$K_s = \frac{\sum_{i=1}^n (f_i \sigma_{ni}) l_i}{\sum_{i=1}^n \tau_{ni} l_i} \quad (3)$$

式中: f_i 为各分段摩擦系数, 取 0.4~0.6。依据 GB 50139—2014《内河通航标准》, 要求运行工况 $K_s \geq 1.05$, 完建及校核工况 $K_s \geq 1.0$ 。该计算理论

可为后续有限元分析中的整体稳定性评价提供依据。

3 数值分析

3.1 三维有限元模型构建

基于前述计算理论建立精细化模型, 包括 8 层 46 个 C35 预制标准件及 C25 底板, 共 33 301 节点、15 920 单元, 见图 7。接触面设置库仑摩擦 $\mu=0.6$, 螺栓和锚筋用桁架单元模拟。材料参数见表 1。

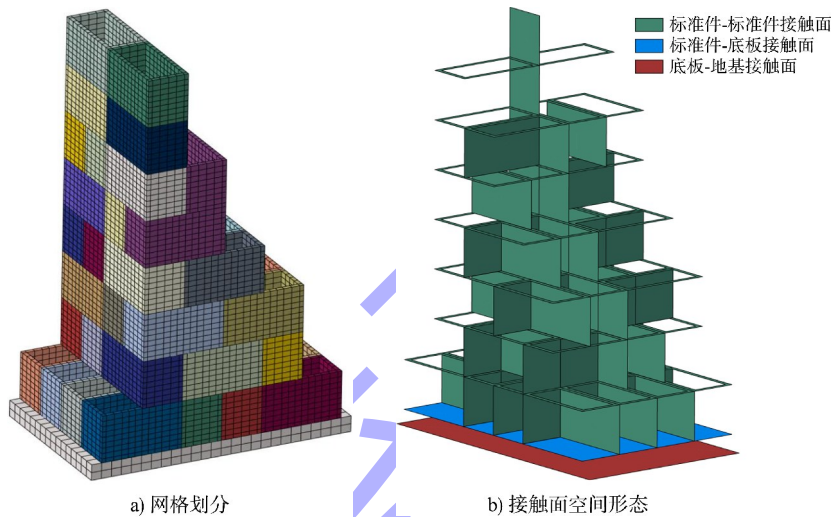


图 7 装配式导航墙网格划分及接触面空间形态

Fig. 7 Assembled navigation wall mesh generation and spatial morphology of contact surfaces

表 1 材料及计算参数

Tab. 1 Material and calculation parameters

材料/接触面	弹性模量/GPa	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	泊松比	抗拉强度/MPa	抗压强度/MPa	屈服强度/MPa	摩擦系数
混凝土标准件	30	2 380	0.167	2.20	23.4	-	-
混凝土底板	28	2 380	0.167	1.78	16.7	-	-
螺栓	210	7 850	0.258	-	-	300	-
锚筋	210	7 850	0.258	-	-	300	-
标准件-标准件	-	-	-	-	-	-	0.6
标准件-底板	-	-	-	-	-	-	0.6
底板-地基	-	-	-	-	-	-	0.4

3.2 计算工况与荷载设定

设定 4 种工况, 包括运行高水位、运行低水位、完建工况、校核工况。荷载包括自重、土压力、水压力及扬压力, 土压力按库仑理论计算 (填土内摩擦角 $\varphi = 32^\circ$, 外摩擦角 $\beta = 15^\circ$), 见表 2。

表 2 计算工况与荷载组合

Tab. 2 Calculation cases and load combinations

工况编号	计算情况	墙前水位/m	墙后水位/m	自重	土压力	水压力	扬压力
1	运行高水位	346.44	346.94	√	√	√	√
2	运行低水位	340.50	342.50	√	√	√	√
3	完建工况	-	-	√	√	-	-
4	校核工况	353.99	353.99	√	√	√	√

3.3 应力及稳定控制标准依据

依据 GB 50139—2014《内河通航标准》设定应力与稳定控制标准, 见表 3。抗滑稳定系数 K_s 采用应力代数和比值法计算, 基于第 2.1 节的摩擦系数理论计算出 $f=0.4$ 。混凝土应力限值参考 C35/C25 材料强度, 即抗拉 2.2 MPa, 抗压 23.4 MPa。

表 3 抗滑稳定安全系数
Tab. 3 Safety factors against sliding stability

荷载组合	2、3 级水工建筑物安全系数	
基本组合	运行情况	≥ 1.05
	完建情况	≥ 1.0
特殊组合	校核情况	≥ 1.0
	运行期地震情况	≥ 1.0

3.4 多工况下应力变形与整体稳定性分析

基于三维非线性有限元模型, 针对表 2 中 4 种工况, 系统分析装配式导航墙的位移特性、应力响应、连接性能及整体稳定性。其中, 导航墙位移和接触滑移特征点见图 8, 应力特征点见图 9。

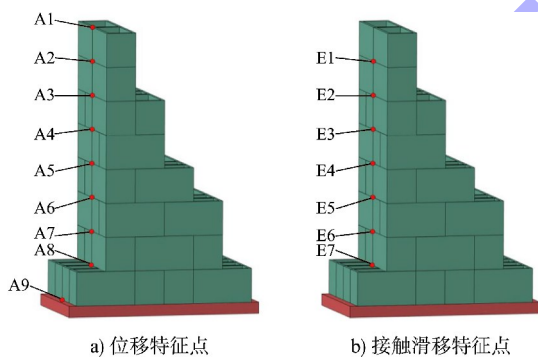


图 8 导航墙位移和接触滑移特征点
Fig. 8 Characteristic points of navigation wall displacement and contact slip

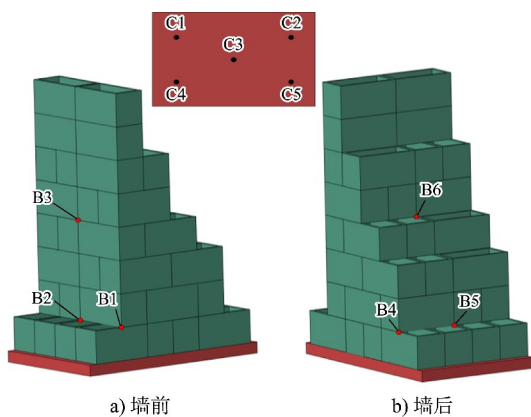


图 9 导航墙应力分析特征点

Fig. 9 Characteristic points for stress analysis of navigation walls

3.4.1 位移特性

装配式导航墙在 4 种工况下均呈现偏向墙前的整体位移趋势, 位移量自墙顶至底板递减。不同工况下的墙顶特征点位移见表 4。

高水位工况(工况 1)墙顶水平位移为 9.54 mm (A1 点), 底层标准件相对于底板位移为 1.46 mm (A9 点)。位移云图显示位移梯度均匀, 归因为墙后填土高程高于墙前导致的土压力主导作用。低水位工况(工况 2)墙顶位移达 13.02 mm (A1 点), 为 4 种工况的最大值。该工况下墙后水位高于墙前, 水-土耦合作用加剧了位移。完建工况(工况 3)无水压条件下, 墙顶位移为 11.54 mm (A1 点), 土压力为主要荷载。

表 4 墙顶特征点位移

Tab. 4 Displacements of characteristic points at wall top mm

工况编号	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1	9.54	9.09	8.46	6.77	6.29	4.43	3.98	2.72	1.46
2	13.02	12.49	11.79	10.02	9.45	6.90	6.31	4.42	2.61
3	11.54	11.02	10.33	8.57	8.01	5.47	4.90	3.05	1.21
4	5.39	5.18	4.15	4.28	4.01	3.33	3.01	2.25	1.37

3.4.2 应力响应

导航墙整体以受压状态为主, 局部应力集中现象见于标准件角点区域。墙前特征点 B1、B2、B3 及墙后特征点 B4、B5、B6 的大主应力见表 5, 小主应力见表 6。混凝土应力分布结果显示, 高水位工况(工况 1)墙前特征点 B1 小主应力为 -8.46 MPa, 墙后 B4 大主应力为 0.12 MPa, 均低于 C35 混凝土抗压强度 23.4 MPa 与抗拉强度 2.2 MPa。校核工况(工况 4)下, 墙后特征点 B4 大主应力为 495.22 kPa, 局部角点应力达 6~10 MPa。底板压应力最大值出现于低水位工况。

表 5 墙前后特征点大主应力

Tab. 5 Maximum principal stress at characteristic points in front and behind the wall kPa

工况编号	墙前特征点			墙后特征点		
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	-1 250.00	-1 040.00	-25.59	120.00	300.00	7 350.00
2	-1 850.00	-1 670.00	18.08	68.22	260.00	35.77
3	-1 820.00	-1 620.00	1.87	330.00	930.00	360.00
4	-962.06	-308.76	211.53	495.22	404.12	60.86

表 6 墙前后特征点小主应力

Tab. 6 Minimum principal stress at characteristic points in front and behind the wall MPa

工况 编号	墙前特征点			墙后特征点		
	B1	B2	B3	B4	B5	B6
1	-8.46	-7.44	-0.81	-0.68	-0.39	-0.23
2	-10.60	-9.22	-0.68	-0.53	-0.32	-0.20
3	-10.60	-9.20	-0.68	-0.65	-0.23	-0.20
4	-7.57	-5.82	-0.76	-1.42	-0.51	-0.48

钢筋应力分布结果显示，螺栓应力水平较低。校核工况(工况 4)下螺栓最大主应力 215.30 MPa 低于屈服强度 300 MPa，处于弹性工作状态，见图 10。锚筋束在校核工况(工况 4)下部分单元达到屈服强度 300 MPa，集中于第 2、3 层标准件间墙后一侧，见图 11。

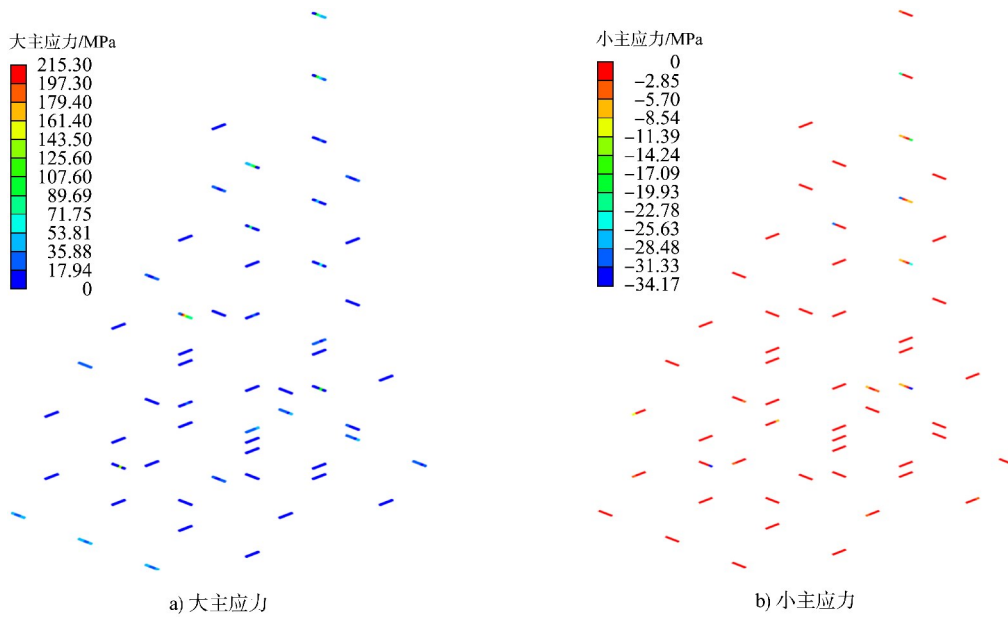


图 10 工况 4 螺栓应力分布 Fig. 10 Bolt stress distribution under Case 4

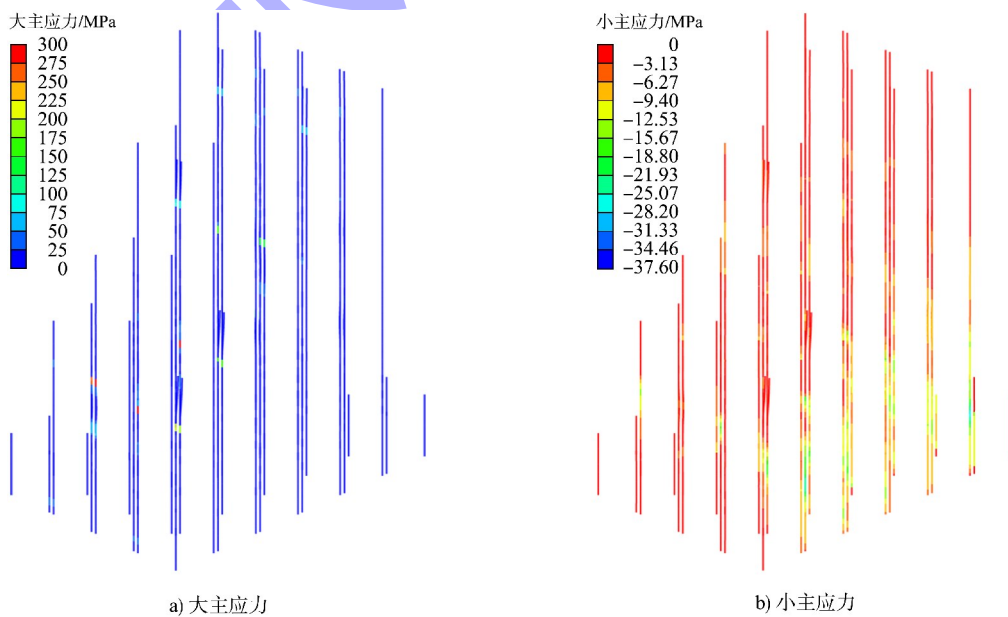


图 11 工况 4 锚筋应力分布 Fig. 11 Anchor bar stress distribution under Case 4

底板特征点压应力值见表7,统计结果显示,底板整体压应力水平较低,均在地基允许承载力700 kPa以内。

表7 底板特征点压应力值统计
Tab.7 Statistics of compressive stress at characteristic points on the base slab kPa

工况编号	C1	C2	C3	C4	C5
1	-237.95	-587.11	-425.90	-323.60	-396.89
2	-227.90	-696.39	-374.16	-219.71	-496.65
3	-219.23	-657.68	-339.85	-213.18	-480.89
4	-236.68	-450.23	-517.20	-286.67	-253.02

3.4.3 连接性能

连接系统(层内螺栓与层间锚筋)的可靠性通过应力与滑移量评估。标准件-标准件接触面特征点E1(第7、8层标准件接触面特征点)~E7(第1、2层标准件接触面特征点)接触滑移量统计见表8。校核工况下螺栓主应力达到最大值215.30 MPa,低于屈服强度,无塑性变形。锚筋束在校核工况出现屈服单元,集中于层间接触面滑移较大区域(第2、3层标准件间)。滑移量最大值为1.07 mm,出现于低水位工况E4点,表明即使出现局部屈服风险,但锚筋抗滑移机制有效。

表8 标准件-标准件接触滑移量统计
Tab.8 Statistics of contact slip between standard components mm

工况编号	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7
1	0.17	0.57	0.00	0.82	0.49	0.64	0.00
2	0.16	0.57	0.00	1.07	0.77	0.97	0.01
3	0.00	0.06	0.16	0.23	0.50	0.00	0.00
4	0.00	0.06	0.00	0.16	0.23	0.50	0.00

3.4.4 整体稳定性

采用应力代数和比值法计算抗滑稳定安全系数,各工况下的底板-地基接触面法向合力、切向合力、摩擦系数及抗滑安全系数见表9。工况1下 $K_s=1.25$,工况2下 $K_s=1.15$,工况3下 $K_s=1.45$,工况4下 $K_s=1.30$,均大于规范值。底板-地基界面滑移量 ≤ 1.46 mm,各层标准件间滑移量 ≤ 1.07 mm,表明接触面保持贴合状态。

表9 抗滑稳定分析计算结果

Tab.9 Calculation results of anti-sliding stability analysis

工况编号	底板-地基接触面法向合力/MN	切向合力/MN	摩擦系数	抗滑安全系数	规范值
1	16.10	5.51	0.4	1.25	1.05
2	20.40	7.64	0.4	1.15	1.05
3	27.90	7.73	0.4	1.45	1.00
4	12.70	4.27	0.4	1.30	1.00

4 结论

1) 提出“层内高强螺栓+层间纵向锚筋”双重连接的全装配式导航墙结构体系,该体系通过模块化标准件分层装配与现浇底板锚固实现了整体协同受力。数值模拟与多工况分析表明,结构最大滑移量仅为1.07 mm,螺栓应力最大为215.3 MPa,始终低于屈服强度。锚筋虽局部屈服但未影响整体性能。

2) 揭示了螺栓抗剪与锚筋抗滑移机制的工作性能。研究表明,连接系统在设计荷载下保持弹性工作状态,抗滑稳定安全系数为1.15~1.45,地基最大压应力为-696.39 kPa,表明结构抗滑稳定性与地基承载力满足规范要求。

参考文献:

- [1] 王锦迪,侯剑岭,贺润阳.内河智慧航道建设形势需求与发展展望[J].珠江水运,2025(13):91-93.
WANG J D, HOU J L, HE R Y. Situation, demand and development prospect of inland smart waterway construction[J]. Pearl River water transport, 2025(13): 91-93.
- [2] 张湛,刘洋,赵凯.急弯河段新建船闸上游引航道通航条件研究[J].水运工程,2024(7):104-110,116.
ZHANG Z, LIU Y, ZHAO K. Navigation conditions of approach channel upstream of newly built ship lock in sharp bend river section [J]. Port & waterway engineering, 2024(7): 104-110, 116.
- [3] 袁泉,沈兆龙,陈旭.船闸施工期混凝土开裂成因及防控[J].珠江水运,2025(7):76-78.
YUAN Q, SHEN Z L, CHEN X. Causes and prevention of concrete cracking during shiplock construction [J]. Pearl River water transport, 2025(7): 76-78.

[4] 陈旭, 沈兆龙. 输水廊道下闸首大体积混凝土温控试验[J]. 中国水运, 2024(24): 81-82, 85.
CHEN X, SHEN Z L. Temperature control test of mass concrete at the lower gate head of water conveyance corridor[J]. China water transport, 2024(24): 81-82, 85.

[5] 王劼耘, 何俊辉, 闫强, 等. 平陆运河青年枢纽船闸大体积混凝土质量控制[J]. 广西大学学报(自然科学版), 2025, 50(3): 467-478.
WANG J Y, HE J H, YAN Q, et al. Quality control of mass concrete in ship locks of Pinglu Canal Qingnian Hub[J]. Journal of Guangxi University (natural science edition), 2025, 50(3): 467-478.

[6] 阮复兴, 谢彦辉. 东河水利枢纽工程船闸沉箱的预制与吊装[J]. 西部探矿工程, 2001, 13(S1): 31-32.
RUAN F X, XIE Y H. Prefabrication and hoisting of caisson of lock in Donghe water control project [J]. West-China exploration engineering, 2001, 13 (S1): 31-32.

[7] 陈秋声. 大型船闸多空箱混凝土结构预制钢筋混凝土模板施工技术[J]. 工程技术研究, 2021, 6(13): 96-97.
CHEN Q S. Construction technology of precast reinforced concrete formwork for multi-empty box concrete structure of large ship lock [J]. Engineering and technological research, 2021, 6(13): 96-97.

[8] 白久林, 杨俊杰, 王瑞毅, 等. 预应力连接型全装配式梁板风电基础结构设计方法与受力性能[J/OL]. 土木工程学报, 1-12 [2025-08-06]. <https://DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24090752>.
BAI J L, YANG J J, WANG R Y, et al. Design method and mechanical performance of prestressed connection type fully assembled raft wind turbine foundation structure[J/OL]. Chinese Journal of civil engineering, 1-12[2025-08-06]. <https://DOI: 10.15951/j.tmgcxb.24090752>.

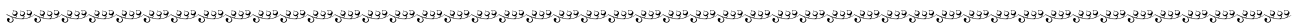
[9] 徐龙河, 黄楚城, 谢行思. 自复位支撑钢框架摩擦装配式节点性能研究[J]. 振动工程学报, 2024, 37(7): 1239-1249.
XU L H, HUANG C C, XIE X S. Performance study of frictional prefabricated connection nodes in self-centering braced steel frame[J]. Journal of vibration engineering, 2024, 37(7): 1239-1249.

[10] 肖佳栋, 屈魏超, 刘涛. 考虑不同连梁跨高比的装配式混凝土联肢剪力墙基础隔震结构受力性能分析[J]. 工程抗震与加固改造, 2022, 44(2): 105-112.
XIAO J D, QU W C, LIU T. Mechanical performance study of precast concrete coupled shear wall base-isolated structures considering different span-height ratio of coupling beams [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2022, 44(2): 105-112.

[11] 程蓓, 屈魏超, 雷远德. 装配式与现浇钢筋混凝土联肢剪力墙基础隔震结构受力性能对比研究[J]. 工程抗震与加固改造, 2021, 43(4): 81-87, 80.
CHENG B, QU W C, LEI Y D. Studies of mechanical performances of precast concrete coupled shear wall base-isolated structures compared with cast concrete coupled shear wall base-isolated structures [J]. Earthquake resistant engineering and retrofitting, 2021, 43(4): 81-87, 80.

[12] 张发明. 地质工程设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2008.
ZHANG F M. Geological engineering design [M]. Beijing: China Water & Power Press, 2008.

(本文编辑 王传瑜)



(上接第 84 页)

[13] 冯华龙, 董旭晨, 戴进, 等. 一种移动式装船机: CN213622372U[P]. 2021-07-06.
FENG H L, DONG X C, DAI J, et al. A mobile ship loader: CN213622372U[P]. 2021-07-06.

[14] 唐颖, 张志霞, 商剑平. 面向双侧靠船全回转作业的新型煤炭码头通过能力仿真研究[J]. 水运工程, 2015(12): 59-63.
TANG Y, ZHANG Z X, SHANG J P. Simulation analysis of throughput capacity of new coal terminal oriented to bilateral sides berthing & ship-loader whole rotating operation mode[J]. Port & waterway engineering, 2015(12): 59-63.

[15] 林星铭, 秦飞, 彭功生. 一种适应桥式抓斗卸船机作业的封闭式转运设施: CN108147146B[P]. 2024-04-23.
LIN X G, QIN F, PENG G S. A closed transfer facility adapted for bridge grab ship unloader operation: CN108147146B[P]. 2024-04-23.

(本文编辑 赵娟)