



在役船闸结构三维有限元分析及安全评估

冯章, 刘志伟

(广州南沙产业建设管理有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 针对下伏溶洞地质条件引发的在役船闸结构安全隐患问题, 以连江界滩枢纽船闸上闸首为对象, 通过三维有限元建模与多场景分析, 量化溶洞对结构力学行为的影响, 并提出针对性加固方案。采用 ANSYS 软件构建三维精细化模型, 选用 Drucker-Prager 弹塑性模型模拟岩土地基, 结合 SOLID65 单元模拟混凝土与浆砌石材料特性, 并引入接触单元模拟闸首与地基的相互作用。计算结果表明, 基底溶洞引发应力重分布, 左闸墩拉应力集中是主要安全隐患, 建议采用压力灌浆填充溶洞并结合碳纤维布或钢衬板补强受拉区。提出的“三维有限元-现场监测”闭环评估方法为岩溶区船闸安全评估提供了量化分析框架, 其建模方法、加固策略及监测阈值设定可为同类工程提供参考, 对延长服役寿命和保障通航安全具有实践价值。

关键词: 安全评估; 船闸上闸首; ANSYS; 数值模拟; 溶岩地基

中图分类号: U641

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2025)11-0152-06

Three-dimensional finite element analysis and safety assessment of in-service ship lock structures

FENG Zhang, LIU Zhiwei

(Guangzhou Nansha Industrial Construction Management Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: Focusing on the safety risks of in-service ship locks induced by underlying karst cavities, this study investigates the upper lock head of the Lianjiang Jietan hub ship lock through three-dimensional finite element modeling (FEM) and multi-scenario analysis to quantify the mechanical impacts of cavities and propose targeted reinforcement solutions. A refined 3D finite element model is developed using ANSYS software, incorporating the Drucker-Prager elastoplastic model for soil-rock foundations, SOLID65 elements to simulate concrete and masonry materials, and contact elements to characterize the interactions between the ship lock head and the foundation. The calculation results reveal that basal cavities induce stress redistribution, with tensile stress concentration in the left pier identified as the primary risk. It is recommended to fill the cavities pressure grouting combined with tensile zone reinforcement using carbon fiber-reinforced polymer (CFRP) sheets or steel lining plates. This research establishes a closed-loop “three-dimensional FEM-field monitoring” evaluation methodology, providing a quantitative framework for safety assessment of navigation locks in karst regions. The modeling approach, reinforcement strategies, and monitoring threshold criteria can offer references for similar projects, demonstrating practical value for extending service life and ensuring navigational safety.

Keywords: safety assessment; lock head; ANSYS; numerical simulation; karst foundation

在我国水利水运基础设施快速发展的背景下, 岩溶区船闸结构因下伏溶洞引发的不均匀沉降与应力集中问题日益凸显, 直接影响工程安全与服役寿命^[1-2]。目前, 针对此类结构的安全评估方法

主要分为两类: 其一为基于规范的平面解析法, 其通过简化结构为二维模型进行内力计算, 虽计算便捷, 但难以反映闸首三维组合效应及地基-结构相互作用^[3-4]; 其二为有限元数值模拟法, 国内

收稿日期: 2025-03-05

作者简介: 冯章(1994—), 男, 硕士, 工程师, 从事水利工程设计、管理工作。

外学者如王新敏^[5]系统阐述了 ANSYS 在工程结构分析中的应用,朱一飞^[6]基于有限元法研究了大坝应力分布特征,王成^[7]进一步探讨了岩溶地基对闸室内力的影响。然而,现有研究多聚焦于均质地基或单一工况分析,对溶洞发育区船闸的多工况精细化建模及量化评价仍存在不足,尤其在溶洞形态参数化、接触非线性模拟及安全阈值设定方面缺乏系统性^[8-10]。

本文以连江界滩枢纽船闸上闸首为研究对象,针对其下伏溶洞导致的结构安全隐患,提出融合“三维有限元模拟-多指标评价-现场监测验证”的综合评估方法。评价指标涵盖位移(水平位移、沉降量)、应力(第一主应力、第三主应力)及材料强度安全系数(抗拉/压强度比),通过对比正常运行、检修及设计洪水工况下的力学响应,量化溶洞对结构的影响程度。

1 船闸结构有限元模拟分析

1.1 工程概况

界滩枢纽是连江渠化工程的第二梯级,位于阳山县同冠峡出口下游约 2.5 km 处,距上一梯级龙船厂枢纽 19.0 km,与下一梯级黄牛枢纽相距 11.0 km,总库容 3 828 万 m³,于 1960 年 12 月竣工。船闸工作闸门为人字形钢闸门;上闸首门槛高程为 77.35 m,下闸首门槛高程为 71.50 m。其中船闸闸首、闸室建基在基岩面上,高程为 70.50~72.50 m,下伏基岩为炭质灰岩,溶沟、溶槽发育。因当时建设标准偏低,经过河水长久侵蚀,未定期进行维护维修,局部区域出现结构安全隐患,且该区域岩溶发育明显。为保障船闸结构安全运行,对船闸结构开展全面的安全评估十分紧要。

1.2 本构模型

为了较好地模拟岩土和上闸首的各种材料特性,本文选用 Drucker-Prager 弹塑性本构模型和线性弹性模型分别模拟岩土和上闸首。其屈服准则的等效应力 F 表达式为:

$$F = 3\beta\sigma_m + \sqrt{J_2} - k \quad (1)$$

其中:

$$\beta = \frac{2\sin\varphi}{3-\sin\varphi} \quad (2)$$

$$k = \frac{6c\sin\varphi}{3-\sin\varphi} \quad (3)$$

式中: β 、 k 为材料常数; φ 为内摩擦角; c 为黏聚力; σ_m 为平均应力或静水压力; J_2 为偏应力张量第二不变量。

1.3 模型建立

1.3.1 单元选择

采用 SOLID45 单元模拟地基和回填土模型,采用 SOLID65 单元模拟含钢筋或不含钢筋的三维实体模型。采用 TARGET170 与 CONTA174 接触单元模拟闸首边墩与回填土之间的接触。

1.3.2 网格划分和约束

为平衡计算精度和计算效率,经过多次调整优化建模参数,本文在建模时基岩深度取闸高的 3 倍,长、宽取闸宽的 4 倍。整个计算模型共包括 36 814 个节点,181 845 个单元。本模型对地基地面 X 、 Y 、 Z 3 个方向的位移进行约束,对地基左右侧面 X 方向的位移进行约束,对地基前后侧面 Y 方向的位移进行约束,见图 1~2。

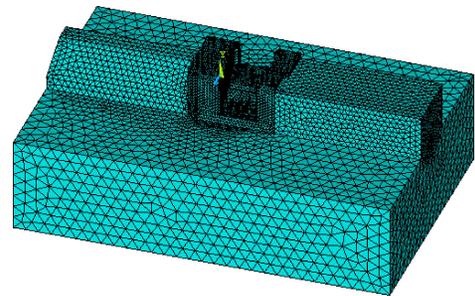


图 1 整体模型

Fig. 1 Overall model

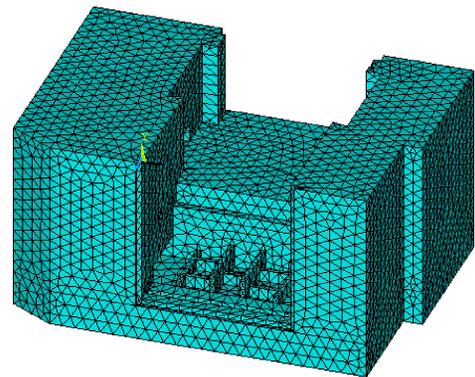


图 2 局部模型

Fig. 2 Partial model

1.3.3 溶洞情况

根据地质资料分析,溶洞 1 在上闸首地基内,走向为北偏东 16°,埋深 10 m,溶洞直径 2 m,溶洞长 93 m,假定溶洞为圆柱体且没有竖直方向倾角,溶洞两端存在垂直于地表的竖向溶洞,且下游侧溶洞与地表连通;溶洞 2 在闸首左边墩前方 4 m,埋深 4.5 m,假设为正方体,边长 4 m,见图 3。

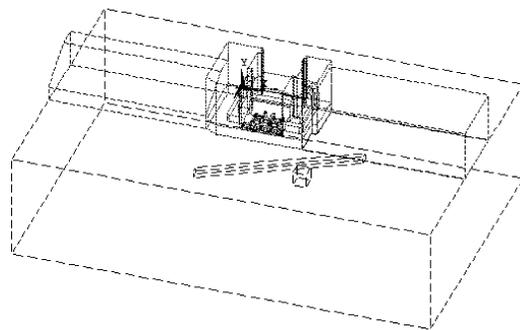


图 3 溶洞模型

Fig. 3 Karst cavity model

1.4 材料特性

计算模拟材料的参数见表 1。

表 1 模拟材料参数

Tab. 1 Simulated material parameters

材料名称	弹性模量/GPa	泊松比	摩擦系数	密度/(kg·m ⁻³)	抗压强度/MPa	抗拉强度/MPa	抗剪强度/MPa
浆砌石	5.800	0.20	0.65	2 100	11.20	0.75	0.75
混凝土 C20	22.500	0.16	0.65	2 500	27.20	2.00	0.75
黏土	0.009	0.20	0.30	1 887	-	-	-
砂卵石地基	0.150	0.25	0.35	2 500	-	-	-
灰岩地基	74.250	0.25	0.65	2 900	117.00	4.00	1.00

1.5 荷载及工况

计算考虑的主要荷载包括闸墙自重力、土体

重力、边墩土压力、边墩后水压力、底板的扬压力及设备力,见表 2。各工况水位组合见表 3。

表 2 荷载情况

Tab. 2 Load conditions

计算情况	自重力	江侧静水压力	扬压力	闸墙间静水压力	土压力	设备力	闸面活荷载
运行工况	√	√	√	√	√	√	-
检修工况	√	√	√	-	√	√	√
设计洪水工况	√	√	√	√	√	√	-

注：“√”代表考虑该项。

表 3 各工况水位组合

Tab. 3 Water level combination of each working condition

工况	墙前水位/m	墙后水位/m
运行工况	81.00	72.80
检修工况	77.00	77.68
洪水工况	84.59	84.59

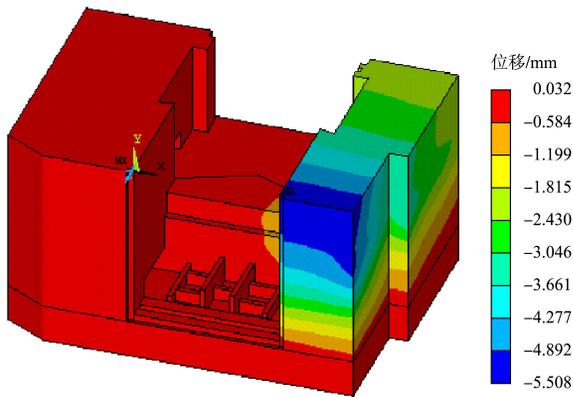
2 结果分析

2.1 位移分析

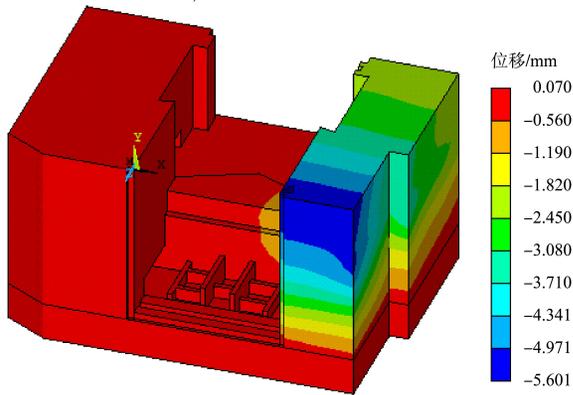
1) X 方向位移。3 个工况下 X 方向水平位移见图 4,右边墩和底板的 X 方向位移很小,位移最大点均出现在左闸墩前侧顶部,在正常运行工况、检修工况及设计洪水工况水平下,位移最大值分别为 5.5、5.6、5.8 mm,方向均指向河侧。左右边墩的位移大小存在差异的原因因为右闸墩的截面积大,抗弯刚度较大;左闸墩沿船闸轴线方向的

水平位移大小存在差异,原因在于沿船闸轴线方向的闸墩宽度不同,且闸门自重力及其上游的静水压力产生了沿船闸轴线方向的分力。闸首总体水平位移不大,但左闸墩的水平位移相对较大。

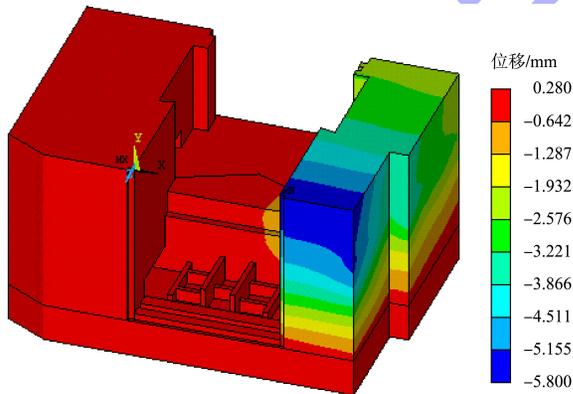
2) Y 方向位移。在 3 种工况中,闸首在竖直方向发生的位移主要是沉降,闸首的竖向位移分布为右闸墩从上到下逐渐减小,左闸墩从内侧到外侧逐渐减小。结构位移大部分在 1.08~0.33 mm,在正常运行工况、检修工况及设计洪水工况闸首的最大竖向位移分别为 2.15、2.19、2.18 mm,最大值均发生在右闸墩的内侧中部,见图 5。左闸墩的竖向位移垂注轴线方向分布不均匀的原因是闸墩与墙后填土的相互作用,以及左闸墩的下方 4.5 m 处存在溶洞,但闸首总体发生的沉降较小。



a) 运行工况



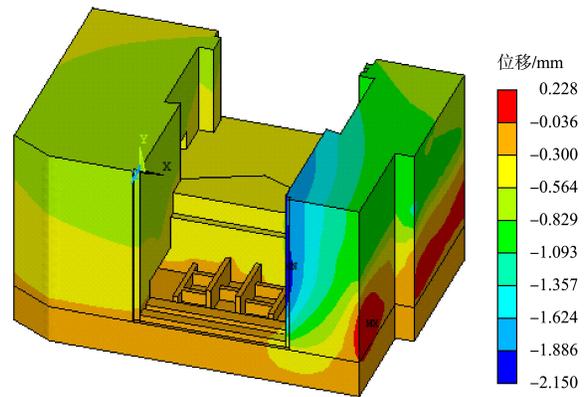
b) 检修工况



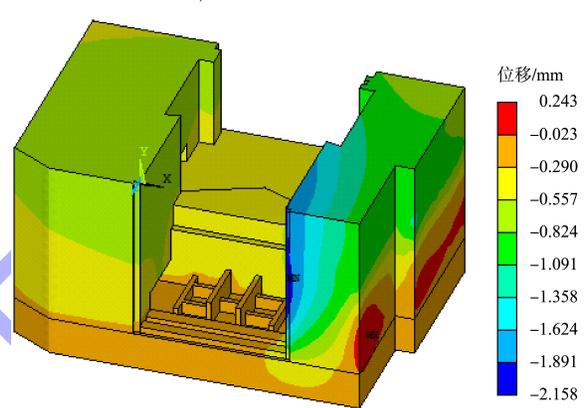
c) 设计洪水工况

图 4 各工况下水平位移分布

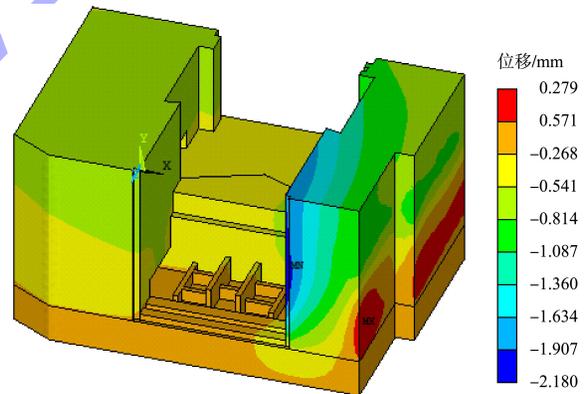
Fig. 4 Horizontal displacement distribution under each working condition



a) 运行工况



a) 检修工况



c) 设计洪水工况

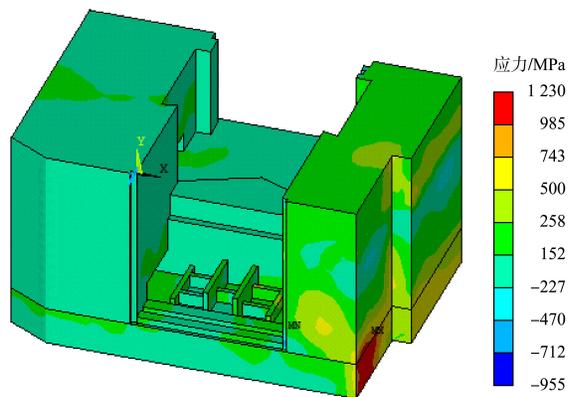
图 5 各工况下竖向位移分布

Fig. 5 Vertical displacement distribution under each working condition

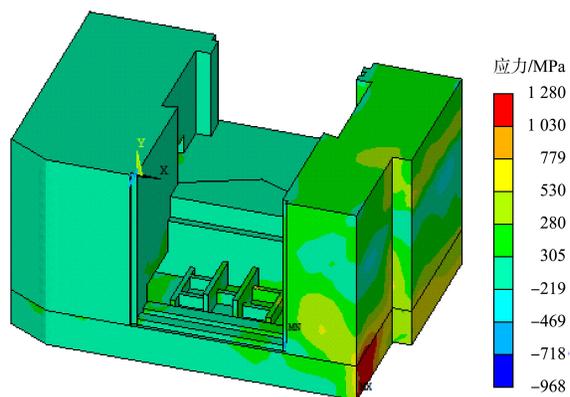
2.2 应力分析

1) 第一主应力分析。3 种工况下闸首的应力分布情况差别不大, 左闸墩的应力分布不均匀, 大部分为拉应力; 右闸墩的应力分布较均匀, 大部分为压应力。由于有溶洞在左闸墩方发育, 产生不均匀沉降, 左闸墩局部区域出现拉应力, 闸首的整体稳定性受到影响。在 3 种工况中, 右闸墩大部分区域的压应力值为 168~227 kPa, 左闸墩

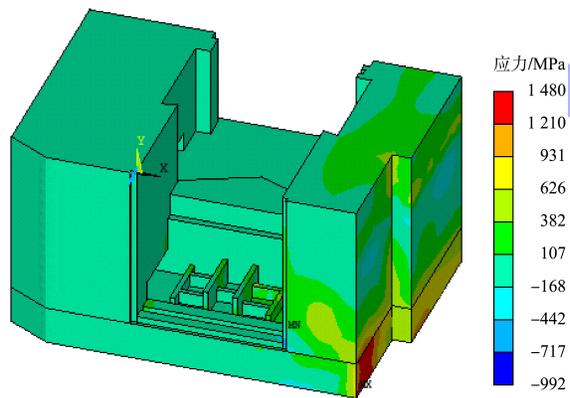
大部分区域值为 31~1 480 kPa; 左闸墩内侧与底板交界处出现应力集中, 左闸墩外侧底部部分拉应力为 500~1 480 kPa, 超过了浆砌石的抗拉强度 750 kPa, 在这个区域可能发生破坏, 见图 6。3 种工况下其他区域的拉应力和压应力均未超过混凝土和浆砌石的抗拉抗压强度, 这与现场实际观测的情况相符。



a) 运行工况

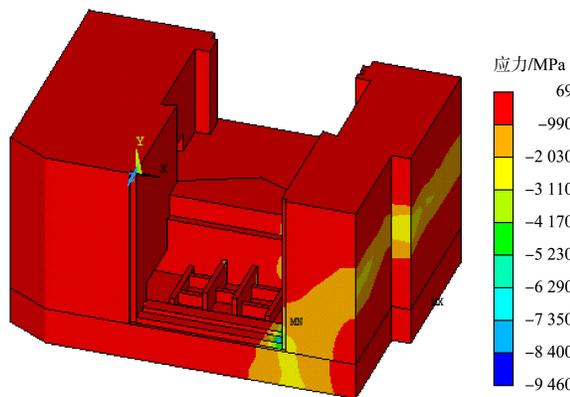


b) 检修工况

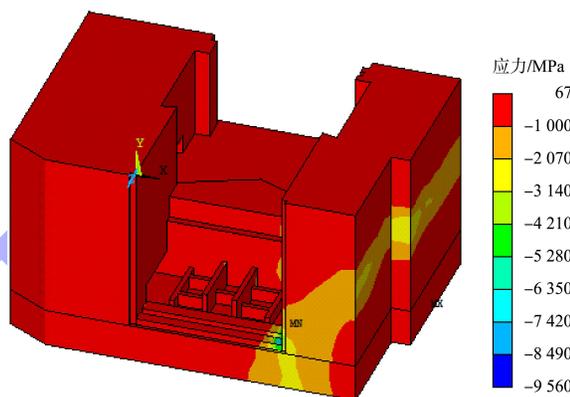


c) 设计洪水工况

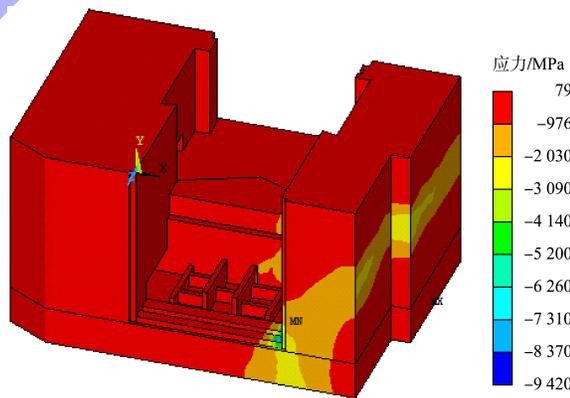
图 6 各工况下第一主应力分布
Fig. 6 Distribution of the first main stress under each working condition



a) 运行工况



b) 检修工况



c) 设计洪水工况

图 7 各工况下第三主应力分布
Fig. 7 Distribution of the third main stress under each working condition

2) 第三主应力。3 种工况下闸首的第三主应力大部分为压应力，由于闸首下面有溶洞，应力的分布受到一定的影响。从闸首左闸墩的底部一直延伸到左闸墩的纵向中部，压应力相对其他区域较大，最大值出现在左闸墩与底板的交界处，为 9 420~9 560 kPa，见图 7。

2.3 安全评价

闸首结构在 3 种工况下的整体变形量较小(竖向位移 < 2.2 mm，水平位移 < 5.8 mm)，主要得益于灰岩地基的高承载性能。然而，基底溶洞的存在显著改变了应力传递路径，导致左闸墩外侧底部形成拉应力集中区，最大拉应力达 1 480 kPa，

超出浆砌石抗拉强度(750 kPa)97.3%。考虑结构耐久性的影响,设定浆砌石与混凝土抗拉强度年均衰减率为0.8%,环境侵蚀系数取1.2,服役30 a后浆砌石抗拉强度由750 kPa降至580 kPa,拉应力超限区域扩大12.5%,裂缝风险从局部扩展至结构关键连接部位。建议优先对溶洞实施压力灌浆加固,同步在左闸墩受拉区增设碳纤维布或钢板补强,并建立位移-应力双控监测预警阈值。

3 结语

1) 本文通过三维有限元法对界滩枢纽船闸上闸首开展多工况安全评估,考虑岩溶地基对上部结构力学响应。研究表明,基底溶洞显著改变应力传递路径,导致左闸墩局部拉应力超限,且长期服役下结构的耐久性降低将加剧风险,需采取灌浆加固或溶洞填充等工程措施。

2) 建立的参数化建模体系可实现溶洞形态与结构响应的定量映射,融合 Drucker-Prager 弹塑性本构与接触非线性分析,验证了数值模拟与现场观测的吻合度,为岩溶区复杂地基分析提供了可靠方法。

3) 构建了岩溶区船闸“三维有限元-现场监测”闭环评估方法,其参数化建模方法与工程阈值可为相关工程提供参考。

4) 未来需进一步探究溶洞群交互效应与时变荷载耦合机制以完善计算模型,建议开发基于机器学习的溶洞动态预测算法,提升全寿命周期管理的智能化水平。

参考文献:

- [1] 邱志博. 基于上限分析有限元的岩溶区地基承载力研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.
QIU Z B. Study on the bearing capacity of foundation in karst areas based on the finite element bound limit analysis[D]. Changsha: Hunan University, 2014.
- [2] 陈洪凯, 梁丹, 董平. 岩溶洞穴土质盖层稳定性分析方法及应用[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 546-552.
CHEN H K, LIANG D, DONG P. The stability analysis methods and its application for soil cover of karst cave[J]. Chinese journal of underground space and engineering, 2016, 12(2): 546-552.
- [3] 陈灿明, 黄卫兰, 张敏, 等. 三河船闸闸室墙安全性评估[J]. 水运工程, 2003(5): 54-57.

- CHEN C M, HUANG W L, ZHANG M, et al. Lock chamber safety evaluation of Sanhe shiplock[J]. Port & waterway engineering, 2003(5): 54-57.
- [4] 应宗权, 郁达, 苏林王. 船闸水工建筑物的检测与评估技术[J]. 水运工程, 2011(7): 100-105.
YING Z Q, YU D, SU L W. On technology of inspection and assessment for hydraulic structures of shiplocks[J]. Port & waterway engineering, 2011(7): 100-105.
- [5] 王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京: 人民交通出版社, 2007.
WANG X M. ANSYS numerical analysis of engineering structures [M]. Beijing: China Communication Press, 2007.
- [6] 朱一飞, 郝哲, 杨增涛. ANSYS 在大坝数值模拟中的应用[J]. 岩土力学, 2006, 27(6): 965-968, 972.
ZHU Y F, HAO Z, YANG Z T. Application of ANSYS to numerical simulation of dam[J]. Rock and soil mechanics, 2006, 27(6): 965-968, 972.
- [7] 王成, 赵利平. 岩溶地基上在役水工结构三维有限元分析和加固效果研究[J]. 工程建设与设计, 2015(7): 76-79, 83.
WANG C, ZHAO L P. Three-dimensional finite element analysis and reinforcement effect of hydro-structure on the karst foundation [J]. Construction & design for engineering, 2015(7): 76-79, 83.
- [8] 苏超, 崔潇菡, 李炳华. 三维有限单元法在某分离式大型船闸闸室结构分析中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2013(2): 133-137.
SU C, CUI X H, LI B H. Application of three-dimensional finite element method in the structural analysis of lock chamber in the large-scale separate shiplock[J]. South-to-north water transfers and water science & technology, 2013(2), 133-137.
- [9] 张敏, 徐铭, 杨步松, 等. 三河船闸的安全检测与加固改造[J]. 水运工程, 2008(2): 86-91.
ZHANG M, XU M, YANG B S, et al. Safety examination and reinforcement of Sanhe navigation lock [J]. Port & waterway engineering, 2008(2): 86-91.
- [10] 王杭州. 船闸水工建筑物结构的检测、评估与维修探讨[J]. 中国水运(下半月), 2010, 10 (5): 194-195, 197.
WANG H Z. Inspection, evaluation and maintenance of ship lock hydraulic structures[J]. China water transport (the second half of the month), 2010, 10 (5): 194-195, 197.

(本文编辑 王传瑜)