

不对称闸墙双铰底板式闸室结构仿真分析

张蕊¹, 杨斌²

(1. 中交第三航务工程勘察设计院有限公司, 上海 200032; 2. 重庆交通大学 河海学院, 重庆 400074)

摘要:以四川省青居船闸工程为背景, 分别采用平面简化法和有限元法对闸室结构进行内力计算, 并同原型观测数据进行对比分析, 结果显示: 简化法较难满足不对称闸墙双铰底板式船闸结构计算的需要, 而基于非线性有限元法的计算成果与结构的真实受力状态吻合较好, 能反映船闸结构内部最不利的位置、受力状态及其变化规律。

关键词: 船闸闸室; 不对称闸墙; 双铰底板; 非线性有限元法

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)06-0136-007

Simulation analysis of ship locks with double-hinged soleplate and asymmetric lock wall

ZHANG Rui¹, YANG Bin²

(1. CCCC Third Harbor Consultants Co., Ltd., Shanghai 200032, China;

2. School of River & Ocean Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: Taking the Qingju ship lock project in Sichuan province as the background, this paper calculates the inner force of lock chamber structure by Plane Simplified Method and Finite Element Method, and carries out an analysis on the prototype observation data, which shows that the Plane Simplified Method is difficult to meet the need of calculation for asymmetric gate double wall floor type reaming of ship lock structures, while the calculation results based on the nonlinear finite element method tallies better with the real stress state. Moreover, it can reflect the most unfavorable position of internal ship lock structures, stress state and the changing laws, and the results may serve as reference for the engineering design of the ship lock.

Key words: lock chamber; ansymmeetric lock wall; double-hinged sole plate; non-linear finite element method

双铰底板式闸室结构是在整体式闸室基础上发展起来的结构形式, 一般适用于粉砂、细砂地基, 应用十分广泛^[1]。对于双铰底板式闸室结构的计算方法, 国内外都曾进行过一些研究, 特别是底板的应力分析中, 提出了诸如简支梁法、折线反力分布法、弹性地基梁法、文克尔假定法等多种计算图式和方法, 这些方法主要是针对对称闸墙结构进行计算, 而对于不对称闸墙的双铰底板式船闸结构的研究甚少^[2-4]。因此, 就不对称闸墙双铰底板式船闸结构展开分析和研究, 总结合理的分析方法、计算方法, 对结构优化设计和保障

船闸结构安全、稳定等方面具有重要意义。

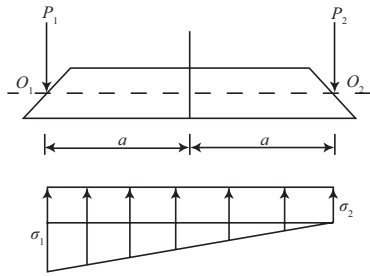
1 不对称闸墙双铰底板内力简化法

基于简化计算方法在假定及使用上存在的局限性^[5], 文献[6]提出了针对不对称闸墙及不对称荷载情况下双铰底板的简化计算方法: 假设地基反力呈折线分布, 分别对左右闸墙、底板进行静力平衡分析, 根据双铰底板的受力特点, 在铰接处只传递剪力不传递弯矩, 并且水平力不会对底板产生弯矩, 故弯矩全部由竖向力 P_1 和 P_2 产生, 进行静力分析过程中分别取底板、左右闸墙为独立

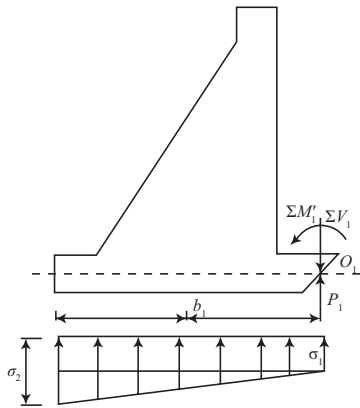
收稿日期: 2012-11-27

作者简介: 张蕊(1985-), 女, 助理工程师, 从事水工工程设计工作。

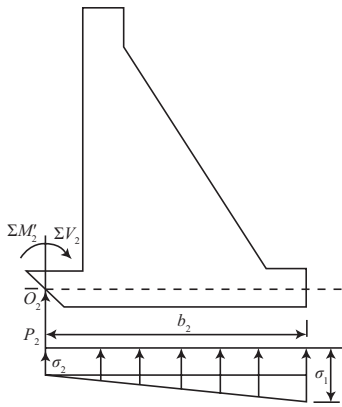
体进行计算, 受力如图1所示。并得到3种计算图示下建立的静力平衡方程:



a) 底板



b) 左闸墙



c) 右闸墙

图1 计算示意图

$$P_2 \times 2a = \sum M_1 + \sigma_2 \times 2a \times 2a/2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \times 2a \times 2a/6 \quad (1)$$

$$P_1 \times 2a = \sum M_2 + \sigma_2 \times 2a \times 2a/2 + (\sigma_1 - \sigma_2) \times 2a \times 2a/3 \quad (2)$$

$$\sum V_1 = P_1 + \sigma_1 \times b_1 + (\sigma_3 - \sigma_1) \times b_1/2 \quad (3)$$

$$\sum M'_1 = \sigma_1 \times b_1 \times b_1/2 + (\sigma_3 - \sigma_1) \times b_1 \times b_1/2 \times 2/3 \quad (4)$$

$$\sum V_2 = P_2 + \sigma_2 \times b_2 + (\sigma_4 - \sigma_2) \times b_2/2 \quad (5)$$

$$\sum M'_2 = \sigma_2 \times b_2 \times b_2/2 + (\sigma_4 - \sigma_2) \times b_2 \times b_2/2 \times 2/3 \quad (6)$$

解方程组得到结果如下:

$$\sigma_1 = \frac{9A\beta - 3Ba}{9\alpha\beta - a^2} \quad (7)$$

$$\sigma_2 = \frac{9B\alpha - 3Aa}{9\alpha\beta - a^2} \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \frac{3\sum M'_1}{b_1^2} - \frac{\sigma_1}{2} \quad (9)$$

$$\sigma_4 = \frac{3\sum M'_2}{b_2^2} - \frac{\sigma_2}{2} \quad (10)$$

式中:

$$A = \sum V_1 - \frac{3\sum M'_1}{2b_1} - \frac{\sum M'_2}{2a} \quad (11)$$

$$B = \sum V_2 - \frac{3\sum M'_2}{2b_2} - \frac{\sum M'_1}{2a} \quad (12)$$

$$\alpha = \frac{b_1}{4} + \frac{2a}{3} \quad (13)$$

$$\beta = \frac{b_2}{4} + \frac{2a}{3} \quad (14)$$

2 闸墙结构空间有限元法

在船闸结构有限元仿真分析时, 考虑到具有接触面的结构在受到的荷载发生变化时, 接触面间的接触状态、两侧接触体的应力状态乃至整个体系应力场之间的变化存在着复杂的非线性关系^[7]。为了合理分析闸墙与墙后回填土体、底板以及闸室底板与基岩之间的相互作用, 准确反映接触面之间应力、位移的相互传递关系, 以及法向的粘结力可能出现的压缩、拉伸乃至脱离状态和切向的粘结力可能出现的相互错动、滑移等, 在不对称闸墙双铰底板式船闸结构的有限元模型中均采用非线性接触模型真实模拟结构的实际受力情况^[8]。

3 工程实例

四川华能青居水电站位于四川省南充市高坪区青居镇境内, 是西部大开发嘉陵江渠化工程中的第12级梯级, 距南充市约17 km, 属电航结合的综合利用工程。该工程位于嘉陵江IV级航道上,

船闸按Ⅳ级标准设计, 闸室有效尺寸为120 m×16 m×3 m, 水级14.5 m, 属于高边坡开挖船闸, 引航道最大开挖深度达107.97 m。闸室结构细部设计见图2和3, 工程材料参数见表1。

3.1 船闸闸室结构的有限元模型

本文建立的有限元模型长度方向选取两个沉

降缝之间的一段为18 m; 宽度方向以闸室纵轴线为中心线, 两边各取70 m; 深度方向以闸室顶部为上边界, 向下取70 m; 闸室底部基岩取32.6 m, 闸墙左、右两侧则分别取54.2 m^[9], 见图4。

闸室结构进行网格划分中, 实体单元采用 SOLID45单元, 网格形状为六面体; 接触面的

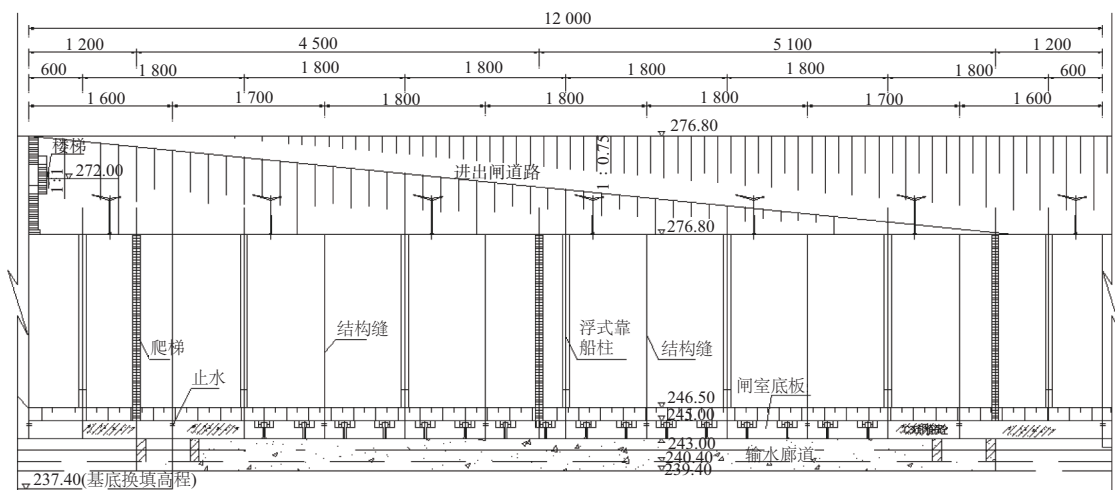


图2 闸室结构纵剖面

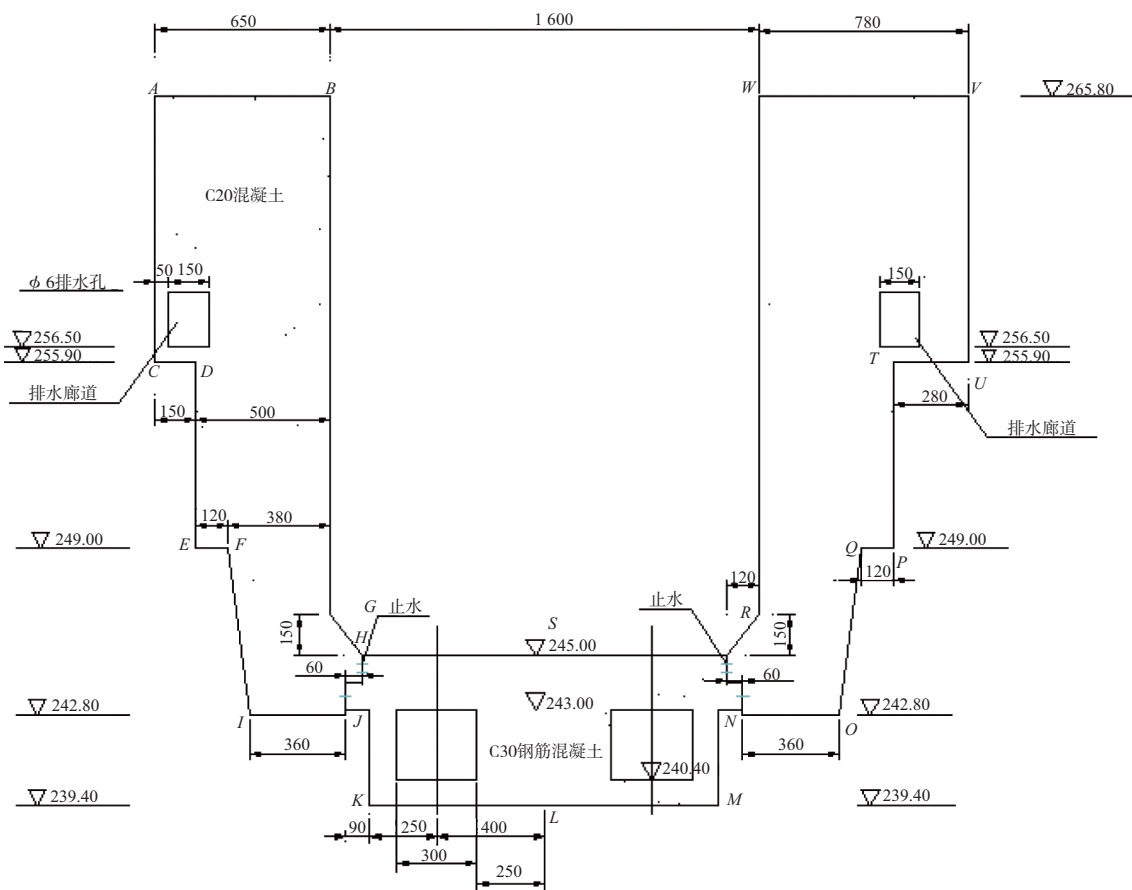


图3 闸室结构横剖面

表1 工程材料参数

材料	密度 $\rho/(\text{t} \cdot \text{m}^{-3})$	弹性模量 E/GPa	泊松比 ν	粘聚力 C/MPa	内摩擦角 $\varphi/(\text{°})$	摩擦系数 f
混凝土C20	2.400	26.0	0.167			0.55
混凝土C30	2.425	30.0	0.200			
砂卵石	1.900	0.3	0.350	0.02	33	0.30
饱和砂卵石	2.020	0.3	0.350	0.03	30	0.30
基岩	2.600	6.4	0.280	0.10	35	0.65

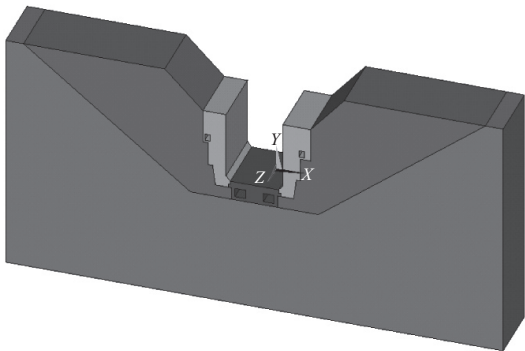


图4 船闸闸室模型

目标单元和接触单元分别采用TARGE170单元和CONTA173单元来模拟3-D接触对, 其中, 各个不同的接触对之间通过设置不同的实常数号来进行识别。本模型中共有67 133个单元(其中两侧闸室墙与闸室底板之间的接触面单元共240个, 两侧闸墙结构以及底板左右两侧与回填材料之间的接触单元共2 760个, 底板与基岩之间的接触单元共540个), 总计节点71 445个, 船闸结构三维有限元网格如图5所示。

对有限元计算模型施加节点约束如下: 对基岩左右两侧($x=-70.0\text{ m}$, $x=70.0\text{ m}$)的节点, 选用X方向的位移约束; 对基岩底面($y=-32.6\text{ m}$)

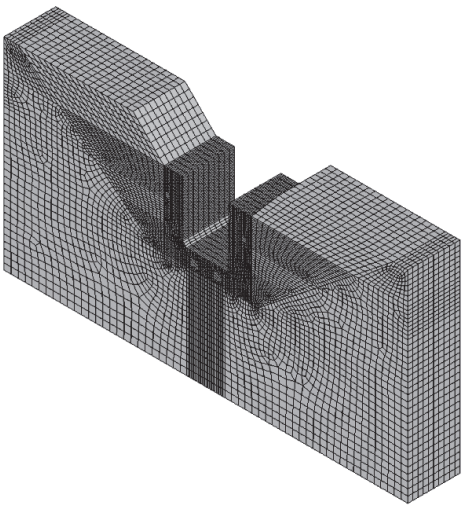


图5 船闸模型网格

节点选用三向位移约束; 对前后两侧面($z=0\text{ m}$, $z=18\text{ m}$)的节点选用对称约束。

3.2 两种方法计算结果与原型观测数据对比分析

结合船闸结构的受力特点, 分别运用前面介绍的简化算法及有限元法对完建工况、运行工况、检修工况以及特殊工况下的闸室结构进行计算, 并将所得分析结果与原型观测数据结果分别进行对比, 数据结果见表2。

表2 底板跨中Y方向应力成果表

计算工况	底板跨中应力/MPa				差异/%		
	简化法	有限元法	原型观测数据		1	2	3
			最小值	最大值			
完建工况	0.72	1.66	1.38	1.58	47.8~54.4	4.8~16.0	56.6
运行工况	1.49	1.22	1.18	1.31	13.7~26.3	3.3~6.8	18.1
检修工况	2.19	1.68					8.8
特殊工况	2.57	2.10					5.8

注: 1.差异1为简化法结果与原型观测数据的对比差异。2.差异2为有限元法结果与原型观测数据的对比差异。3.差异3为有限元法结果与简化法结果的对比差异。4.完建工况闸室内无水; 运行工况闸室内水位260.00 m, 闸室墙后水位259.25 m; 检修工况闸室内无水, 闸墙后排水廊道水位257.40 m; 特殊工况闸室内无水, 闸墙外墙后水位250.00 m。

通过表中数据及图6可以看出:

1) 简化法结果与原型观测数据对比分析: 完建工况下, 两者差异较大, 且简化计算结果远小于底板的真实受力, 因此该简化法在计算类似结构工程在完建工况下的受力时存在不安全缺陷; 运行工况下, 两者差异亦较大, 此时简化法结果偏于保守。

2) 有限元结果与原型观测数据对比分析: 两者相差均较小, 有限元计算结果与结构的真实受力情况基本吻合, 而产生差异的主要原因是未对

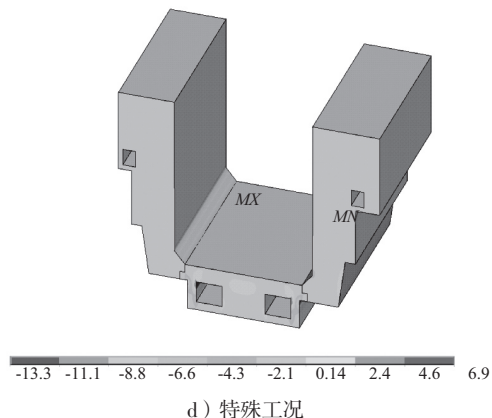
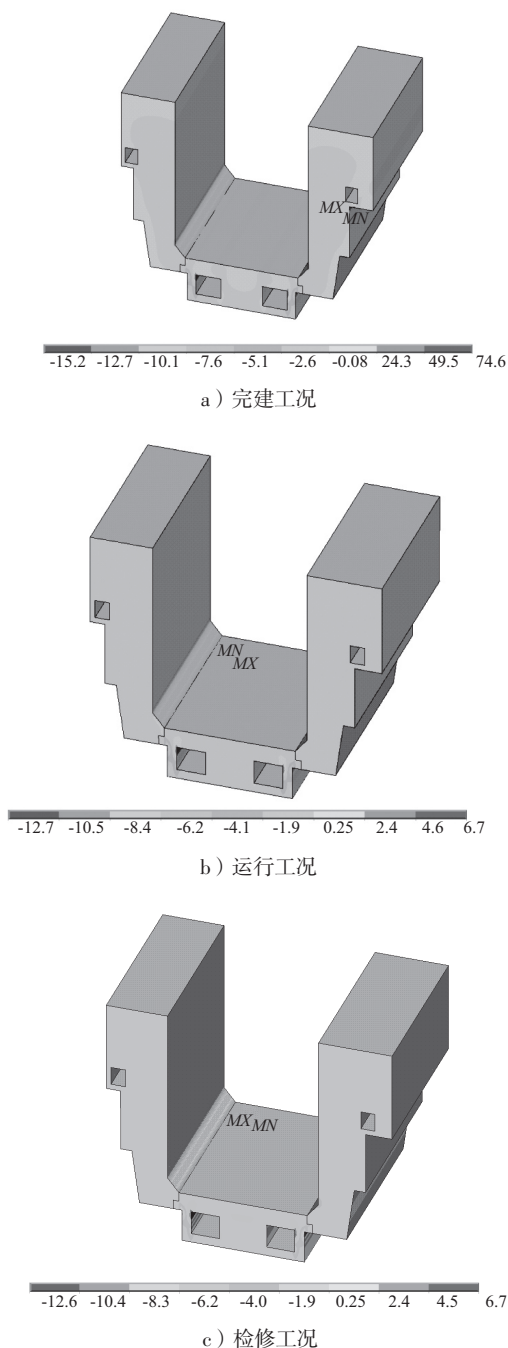


图6 不同工况下闸室结构应力状态 (单位: MPa)

结构的温度场进行耦合。

3) 两种方法计算结果分析: 完建工况下两者差异较大, 且有限元法与原观数据更接近; 运行工况和检修工况下差异有所减小, 简化法仍偏于保守; 特殊工况两者差异不大, 简化法略偏于保守。

不同工况下, 闸室底板输水廊道的角点及底板两侧铰接位置的下缘均出现不同程度的应力集中, 而其他区域的内力值则较小。因此较简化法而言, 有限元程序可以准确确定结构内部最危险的位置及其应力值, 能更为真实反映结构的真实受力状态。

3.3 不同工况下有限元法计算成果对比分析

3.3.1 接触成果对比分析

本文在进行非线性有限元计算时, 对两侧闸室与回填土、闸墙与底板搭接处以及底板与基岩之间的接触面都做了接触分析。接触单元相对于目标面的运动和位置决定了接触单元的状态, 程序检测每个单元并给出了一种状态, 即ST1的值从0到3分别表示未合的远区接触、未合的近区接触、滑动接触和粘合接触^[10]。图7的4幅图分别为4种不同工况下的接触状态图, 图中ST1的值均在2~3, 2~2.111表示接触面为滑动接触面, 即接触面闭合但存在相对滑动; 2.889~3表示接触面属于粘合接触面, 闭合并粘着。

由于地下水位的不同, 各种工况下接触状态随之发生变化, 主要表现在: 一是闸墙与回填土不均匀沉降以及闸墙向外侧偏移的不均匀性, 使得两侧闸墙与回填土的水平接触面及闸墙底板搭接“铰”的上半部均出现局部剪切滑移; 二是运

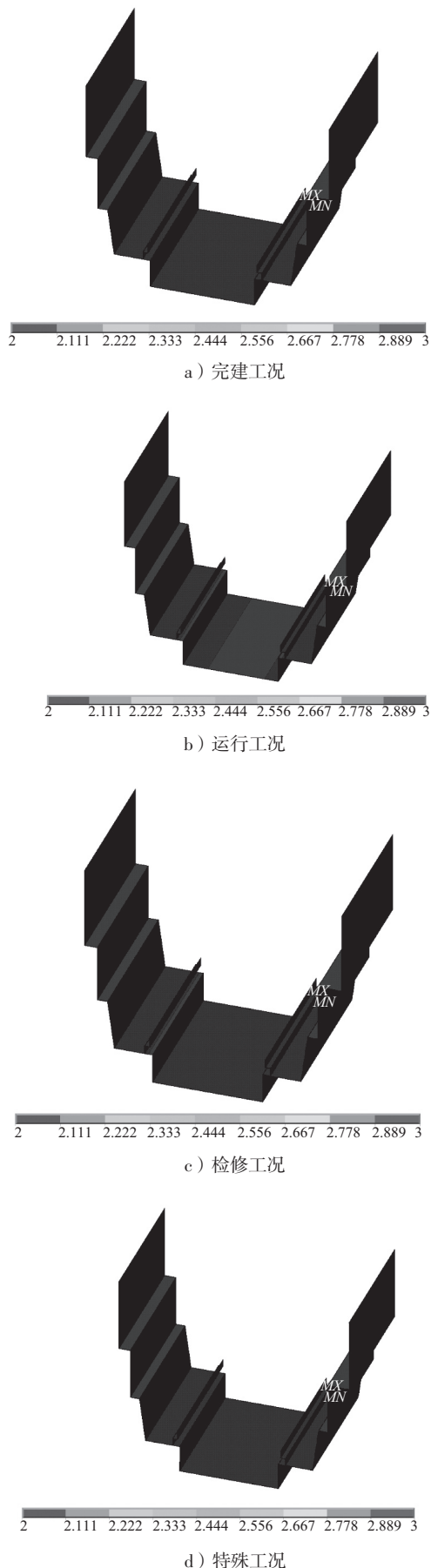


图7 不同工况下闸室结构接触状态 (单位: MPa)

行工况下, 底板与基岩接触面右侧较大范围出现滑动接触面。

3.3.2 应力成果对比分析

不同工况下, 上部结构自重均通过双铰传递到底板, 因此, 在闸室底板两侧铰接处的下缘产生应力集中。由于左右闸墙尺寸不对称使得闸墙与底板所受应力亦呈现不对称性, 且该差异随计算工况的不同而异, 表现为: 完建工况闸室结构所受等效应力值最大, 运行工况和特殊工况次之, 检修工况下最小; 等效应力的最大值均出现在底板右侧铰接位置的下边缘, 可见完建工况下该处最易出现屈服, 见表3。

表3 不同工况下闸室结构应力值					MPa
工况	第一主拉应力	第一主压应力	第三主拉应力	第三主压应力	等效应力
完建工况	7.520	4.150	0.451	15.600	11.500
运行工况	10.80	3.800	1.260	13.200	10.300
检修工况	6.690	3.580	0.633	13.000	9.580
特殊工况	6.910	3.640	0.659	13.700	10.100

3.3.3 地基反力成果对比分析

本文选取一个典型截面A-A来分析基底的反力, 并分别绘制了4种不同工况下的闸室底板地基反力图, 如图8和9所示, 其中X轴表示距闸室底板左边距, Y轴表示相应点的地基反力值。

几种不同工况下, 闸室底板上的地基反力基本呈两边大中间小的U字型曲线分布(但左右不对称), 完建工况下底板的地基反力最大, 运行工况下最小; 由于“铰”的存在, 最大的应力值未出现在底板跨中位置而是在两侧铰接处, 并且除

检修工况外, 均在底板的右铰侧产生较大的应力集中。

4 结语

1) 船闸结构的简化法具有计算简单方便的优点, 但在闸墙内力计算、确定结构应力集中的位置及其大小方面存在局限性, 且部分结构应力计算结果和实际情况偏差较大。说明简化法较难满足不对称闸墙双铰底板式船闸结构计算的需要。

2) 与简化法相比有限元法所得结果与原型观

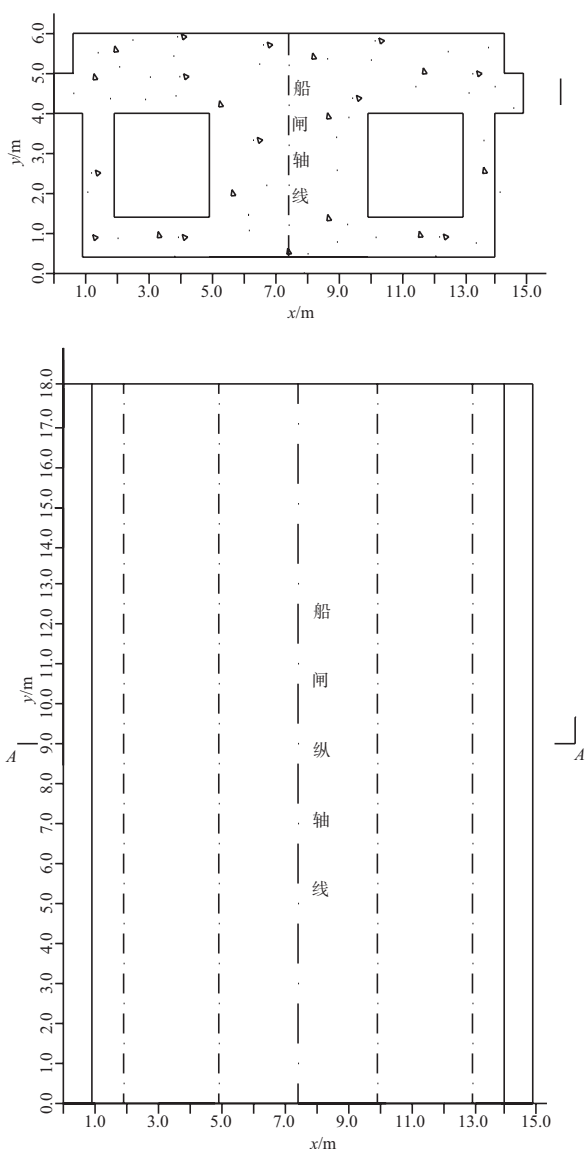


图8 地基反力计算断面

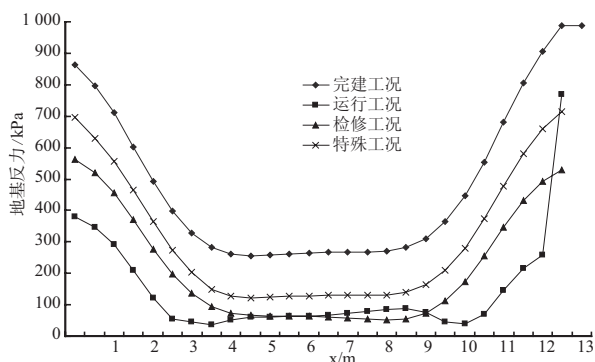


图9 不同工况下底板的地基反力

测数据更为接近,并能方便地找出结构内部最危险的位置及其应力值,可较为真实地反映船闸闸室结构的受力状态。

3) 接触分析表明,在完建、运行、检修和特殊工况下,各接触面的接触状态随计算工况不同而异,其中在运行低水工况下,底板与基岩接触面较大范围出现滑动接触面。

4) 应力分析表明,闸室结构的压应力和等效应力的最大值均发生在闸墙与底板搭接铰的下缘,并且等效应力值在完建工况下最大,运行和特殊工况次之,检修工况最小;底板所受地基反力基本呈两边大中间小的U字型曲线分布,且完建工况下最大,运行工况下最小,其最大值均出现在两侧铰接处。因此,完建工况下闸室底板铰接位置结构和地基最易屈服破坏。

参考文献:

- [1] 周俊波. 有锚灌注桩闸室结构的计算分析与研究[D]. 南京: 河海大学, 2000.
- [2] 苏超, 姜弘道, 谭恩会, 等. 黏弹性基础梁计算方法及应用[J]. 河海大学学报, 2009, 9(28): 101-105.
- [3] 丁行蕊. 双铰底板式船闸结构的分析和应用[J]. 水运工程, 1990(3): 21-24.
- [4] 钮新强, 宋维邦. 船闸与升船机设计[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007: 119-137.
- [5] 王振喜. 双铰底板连续折线理论研究[J]. 工程兵工程学院学报, 1999, 14(2): 65-69.
- [6] 祖福兴. 不对称闸墙不对称荷载情况下的船闸双铰底板的计算[J]. 水运工程, 2004(12): 87-89.
- [7] 李文涛. 基于土与结构接触效应分析的动力相互作用研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2006.
- [8] 张燎军. 水工建筑接触问题的力学模型及其在三峡工程中的应用[D]. 南京: 河海大学, 2005.
- [9] 姚振汉, 王海涛. 边界元法[M]. 北京: 高等教育出版社, 2010.
- [10] 王新敏, 李义强, 许宏伟, 等. ANSYS结构分析单元与应用[M]. 北京: 人民交通出版社, 2011.

(本文编辑 武亚庆)