

# 双向止水铸铁闸门三维有限元计算与分析

陶 玮, 单海春, 王 煦

(江苏省水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 扬州 225127)

**摘要:** 针对某一水利工程中使用的双向止水铸铁闸门, 利用 ANSYS 软件建立了三维有限元模型。在正、反向水头差均为 10 m 的工况下, 采用传统的薄板强度理论计算方法与三维有限元法进行比较与分析, 结果表明两种方法的计算结果存在较大差异, 最大应力与变形的结果误差高达 30%~50%, 其中传统经验公式的计算结果相对保守, 导致铸铁闸门的制造成本加大, 特别是当反向水头作用下最大应力和变形不在同一位置时, 更加凸现。研究发现, 根据铸铁闸门材料自身抗压/抗拉强度以及闸门正/反向受力和变形的变化情况, 来分析相关规范要求的强度与刚度允许值时, 存在不足之处, 因此本文对闸门布置型式和门体的截面尺寸提出优化方案, 降低其制造成本。

**关键词:** 铸铁闸门; 双向止水; ANSYS 计算; 应力; 变形

**中图分类号:** TV 663    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0099-05

## 3D Finite Element Calculation and Analysis of Two-way Water Sealing Cast Iron Gates

TAO Wei, SHAN Hai chun, WANG Xu

(Jiangsu Surveying and Design Institute of Water Resources Co., Ltd., Yangzhou 225127, China)

**Abstract:** A three dimensional finite element model of cast iron gate in a hydraulic project was developed using ANSYS software. Under the working conditions that the forward and reverse head difference was 10 m, the maximum stress and deformation were calculated and analyzed using the thin plate theory and three dimensional finite element method. The results showed that the errors of maximum stress and deformation are as high as 30%~50% for the two methods. The calculation results obtained from the traditional empirical formula were more conservative, which can cause the increasing of manufacturing cost of cast iron gate, especially when the maximum stress and deformation were not at the same place under reverse head. There were deficiencies in analyzing the allowable stress intensity and stiffness required by relative standards according to the compression/tensile strength of the cast iron gate material and the stress and deformation variations of gate under inverse/reverse force. In this paper, the optimization scheme of arrangement type and section size of the gate was proposed in order to reduce the manufacturing cost.

**Key words:** cast iron gate; two way water sealing; ANSYS analysis; stress; deformation

铸铁闸门因其具有良好的耐腐蚀、止水密封好、安装简单、使用寿命较长、日常维护简单等特点, 已经得到广泛的使用。最初使用于给排水工程<sup>[1]</sup>, 逐步推广至市政工程、农田水利工程。如果在铸铁闸门门体和门框上安装楔型压块便能实现双向止水, 非常适用于具有双向挡水要求的涵闸工程。但多年来, 针对铸铁闸门工程缺乏统一的设计规范, 仅城乡建设部门针对给排水工程制定了《供水排水用铸铁闸门》(CJ/T 3006-1992) 规范(以下简称《规范一》)<sup>[2]</sup>, 该规范适用范围比较窄, 特别是中小型水利工程引用普通钢闸门的设计方法, 还存在较多的问题。江苏省水利行政管理部门于 2011 年颁布了《水利工程铸铁闸门设计制造安装验收规范》

(DB 32/T 1712-2011)(以下简称《规范二》), 旨在加强铸铁闸门设计和制造质量的管理<sup>[3]</sup>, 其中有关铸铁闸门的设计方法与《规范一》相同。

铸铁闸门通常由制造单位根据客户的要求设计, 孔口尺寸大小不一, 结构型式各异, 设计人员通常根据使用场合初定闸门的结构和门体断面尺寸, 按规范进行强度、刚度和稳定性验算<sup>[4]</sup>, 其计算结果经常过于保守, 不能准确反映闸门的实际应力和变形状态<sup>[5]</sup>, 易导致制造成本加大, 效率降低。《规范一》和《规范二》均明确要求铸铁闸门的设计主要核算闸门的面板强度、梁格强度与刚度, 要求铸件的弯曲抗拉安全系数不小于 5, 门体梁格挠度不大于计算跨度 1/1 500; 规

收稿日期: 2013-03-11    修回日期: 2014-03-14    网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.022.html>

基金项目: 江苏省水利科技重点项目(2011072; 2012028)

作者简介: 陶 玮(1969-), 男, 江苏泰州人, 高级工程师, 主要从事水利工程方面的设计研究工作。E-mail: jssstw@126.com

范要求的计算方法基本与平面钢闸门的计算方法基本相同, 面板核算按四周固定弹性薄板承受均布荷载进行, 门体梁格按平面体系筒支梁进行计算。文献[6]曾经对孔口尺寸 40 cm × 40 cm、80 cm × 80 cm 和 100 cm × 100 cm 的铸铁闸门进行破坏试验, 结果表明三种规格的闸门出现微小裂纹(破坏)时, 变形分别达到 1.075 mm、3.185 mm 和 5.02 mm<sup>[6]</sup>, 相对挠度达到 1/411、1/262 和 1/189, 实测应力并不大, 故截面尺寸可适当减小, 减轻重量。

### 1 双向止水铸铁闸门结构布置

铸铁闸门主要由门框导轨、门体、密封圈及可调式楔型压块等部件组成。门框导轨采用浇铸加工, 门框两侧自带导槽, 加工之后作为门体升降的轨道。在门框密封平面加工一道槽, 镶入金属密封座, 作为止水密封兼支承面, 密封座材料采用 ZCuSn5Pb5Zn5(青铜)。门体采用整体浇铸, 在门体平面加工成槽并安装金属密封条, 作为门板的止水密封面。门板两侧与门框侧槽配合, 形成上下滑轨。依靠水压力将门体密封条与门框导轨上的密封座压紧实现正向止水。为达到闸门反向止水效果, 闸门两侧设置楔块, 将密封条顶进实现止水。楔紧副采用螺栓分别与门体和门框上的楔座固定。对于高水头的反向止水, 还需在门顶和门底处设置楔紧副<sup>[8]</sup>。

铸铁闸门面板型式大致分为两种, 一种为是平板加筋型(图 1), 即门板为前面板加筋, 门板整体铸造成方形平板, 面板布置在整个门板的前面, 在面板的后面布置“井”字形的加强筋; 另一种是后拱内筋型(图 2), 即面板布置在门板的后面, 面板浇铸成拱形, 在拱形面板内布置“井”字形的加强筋。两种型式面板的厚度、加强筋的数量以及结构尺寸需要根据闸门规格大小以及设计水头、孔口尺寸等主要参数计算确定。

根据《规范一》和《规范二》要求, 铸铁闸门主要零部件的材料牌号为: 门板、门框、导轨、吊耳均为灰铸铁 HT200, 密封座和楔块为铜合金 ZCuSn5Pb5Zn5, 其中密封座厚度不小于 10 mm。

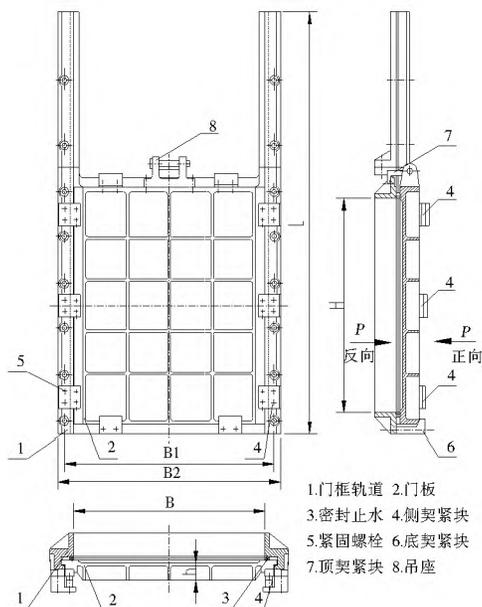


图 1 平板加筋型铸铁闸门

Fig. 1 Plate reinforced cast iron gate

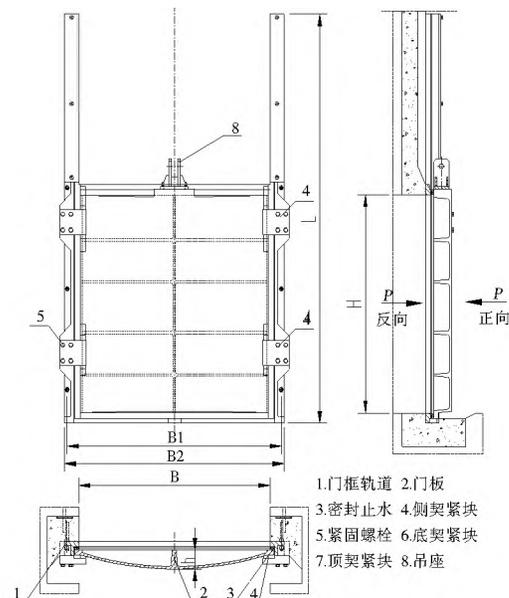


图 2 后拱内筋型铸铁闸门

Fig. 2 Arch reinforced cast iron gate

### 2 铸铁闸门的传统设计计算方法

《规范一》和《规范二》要求按平面钢闸门进行计算, 分别按四周固定弹性薄板承受均布荷载面板应力和平面体系筒支梁核算门体梁格的应力与变形。

图 3(a) 为铸铁闸门的尺寸及门体各部分承受水压力的的大小, 图中  $P$  为作用于闸板上的静水压力(压力的大小与水深成正比)。图 3(a) 中  $h_5$  区间的闸板断面构造如图 3(b) 所示。图 4 表示跨度为  $l$  的该断面梁受力计算简图。设梁  $AB$  上承受的均布荷载为  $q$ , 区间的  $h_5$  总荷载  $P_5$  可由下式计算:

$$P_5 = ql \tag{1}$$

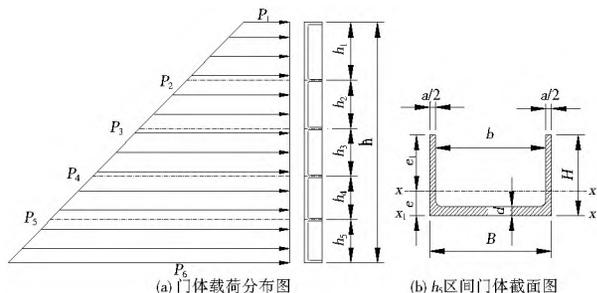


图 3 铸铁闸门门体计算简图

Fig. 3 Calculation diagram for cast iron gate

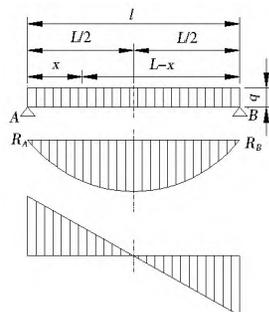


图 4 门体梁板受力计算简图

Fig. 4 Calculation diagram for plate beam stress

式中:  $q$  为板梁单位宽度承受的均布载荷 (N/m);  $l$  为板梁的跨距 (m)。

根据图示梁  $AB$  承受的最大弯矩为:

$$M_{\max} = \frac{ql^2}{8} \quad (2)$$

梁  $AB$  的最大挠度值由下式求得:

$$y = \frac{5ql^4}{384IE} \leq [y] \quad (3)$$

式中:  $y$  为梁  $AB$  的最大挠度值 (m);  $I$  为铸铁闸门门体区间断面惯性距 ( $\text{m}^4$ );  $E$  为铸铁闸门门体材料的弹性模量 (MPa);  $[y]$  为许用挠度,  $[y] \leq l/1\ 500$ 。

梁的最大弯曲应力  $\sigma_{\max}$  由下式计算:

$$\text{最大拉应力 } \sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_1} \quad (4)$$

式中:  $W_1$  为铸铁闸门门体区间断面模数 ( $\text{m}^3$ ) (受拉区)。

$$\text{最大压应力 } \sigma_{\max} = \frac{M_{\max}}{W_2} \quad (5)$$

式中:  $W_2$  为铸铁闸门门体区间断面模数 ( $\text{m}^3$ ) (受压区)。

铸铁材料属于脆性材料, 抗拉强度与抗压强度不相同, 因此在核算弯曲应力时应分别计算拉应力和压应力<sup>[9]</sup>, 特别是对于双向止水的闸门, 应注意闸门的布置方式, 拉应力与压应力均应满足规范要求<sup>[10]</sup>。

### 3 铸铁闸门有限元分析

铸铁闸门的空有限元计算采用的模型为梁板组合结构 (图 5), 板壳单元是一些离散的四边形或三角形薄板单元, 相邻单元以刚节点连接, 相互传递法向力和力矩。板梁之间也相互刚接, 在荷载或外力的作用下, 梁单元也将由于它的弹性而与薄板同时发生形变和位移。划分单元时, 将面板和主次梁腹板相交的节点进行耦合, 使其达到相同的变形协调, 以模拟实际工程中闸门面板与主次梁在交接部位的结构特点。

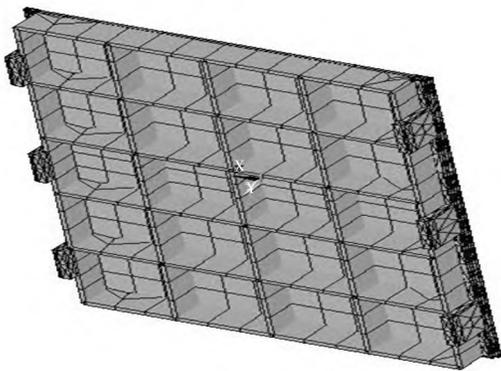


图 5 铸铁闸门有限元计算模型

Fig. 5 Finite element calculation model for cast iron gate

闸门正向挡水工况时, 面板与导轨接触处 (如图 1, 图 2) 施加全约束; 而反向挡水工况时则在楔形块支承处 (如图 1, 图 2) 施加全约束。按设计水头, 根据闸门的正、反向挡水分别在闸门的正面和反面分别施加梯度变化的水压力荷载, 同时考虑闸门自重荷载  $G$ 。

### 4 计算结果分析

本文针对某一工程孔口尺寸为  $2.0\text{ m} \times 2.5\text{ m}$  (宽  $\times$  高)

的铸铁闸门, 分别采用传统的薄板强度理论算法与三维有限元法进行计算。考虑正、反向挡水工况的水头差均为  $10\text{ m}$ , 为方便计算与对比, 均按一侧水头为  $10.0\text{ m}$ , 另一侧无水进行计算。铸铁闸门主要参数与截面尺寸参照图 3, 统一为  $h = 2\ 500\text{ mm}$ ,  $l = 2\ 100\text{ mm}$ , 面板厚度  $d = 25\text{ mm}$ , 筋板高度  $H = 230\text{ mm}$ , 筋板厚度  $a = 25\text{ mm}$ , 筋板间净距  $b = 450\text{ mm}$ 。

采用三维有限元算法, 正、反向挡水工况下, 闸门面板的等效应力及变形计算结果见图 6- 图 9。规范要求铸铁的设计主要核算闸门的面板强度以及梁格强度与刚度, 铸件的弯曲抗拉、抗压安全系数不小于 5, 门体梁格挠度不大于计算跨度  $l/1\ 500$ 。据此将闸门主梁的拉应力、压应力及其变形作为控制对象, 对两种计算方法的结果进行对比分析。表 1 与表 2 分别为正、反向挡水工况下两种计算法的主梁的拉应力、压应力及变形的计算结果。

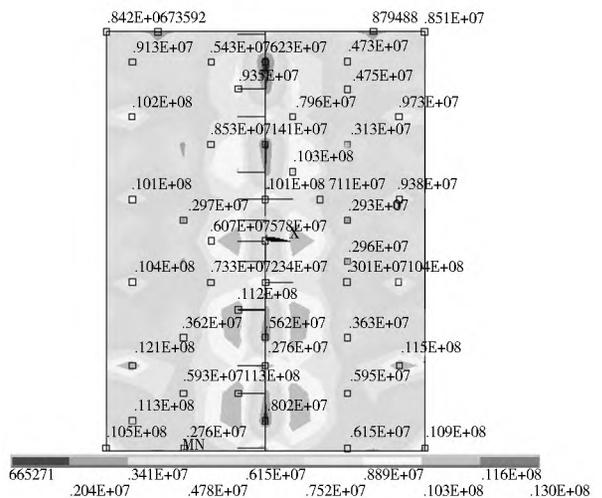


图 6 正向挡水工况闸门面板等效应力 (单位: Pa)

Fig. 6 Stress diagram of gate panel under forward water retaining condition (unit: Pa)

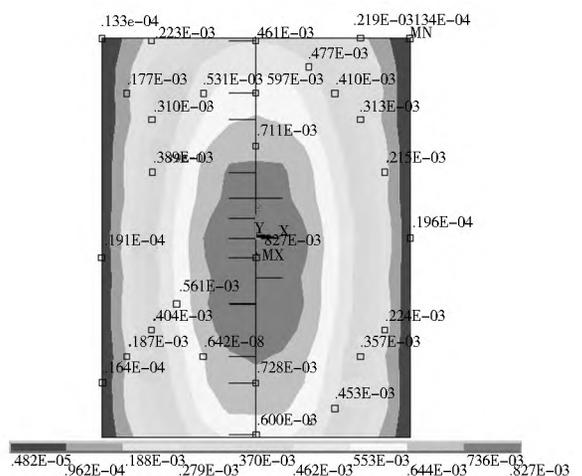


图 7 正向挡水工况闸门面板变形图 (单位: m)

Fig. 7 Deformation diagram of gate panel under forward water retaining condition (unit: m)

从表 1、表 2 可看出采用三维有限元法的计算结果远小于传统强度理论的计算结果, 在反向挡水工况下, 顶主梁的压应力三维有限元计算结果大于传统计算结果。表 3 为正

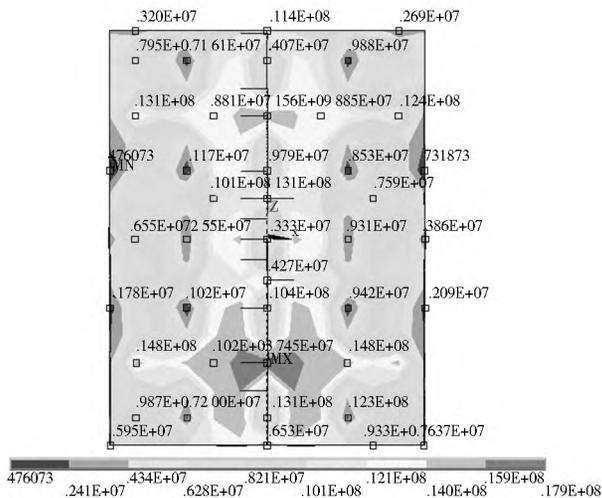


图 8 反向挡水工况闸门面板等效应力(单位: Pa)

Fig. 8 Stress diagram of gate panel under reverse water retaining condition (unit: Pa)

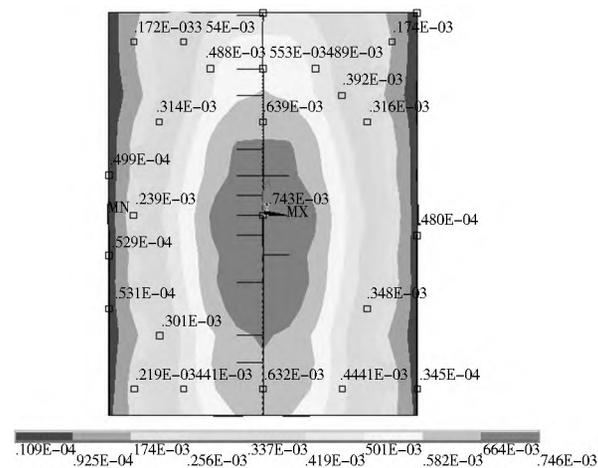


图 9 反向挡水工况闸门面板变形图(单位: m)

Fig. 9 Deformation diagram of gate panel under reverse water retaining condition (unit: m)

表 1 正向挡水工况传统强度理论与三维有限元法计算结果

Table 1 Calculated results from the traditional strength theory under forward water retaining condition and three dimensional finite element method

主梁位置	传统强度理论法			三维有限元法		
	拉应力 $\sigma_{T1}/\text{MPa}$	压应力 $\sigma_{C1}/\text{MPa}$	变形 $f_1/\text{mm}$	拉应力 $\sigma_{T2}/\text{MPa}$	压应力 $\sigma_{C2}/\text{MPa}$	变形 $f_2/\text{mm}$
主梁 1	21.48	46.63	0.951	7.62	35.13	0.596
主梁 2	20.91	83.82	1.527	4.79	47.62	0.747
主梁 3	19.78	79.29	1.445	4.30	51.74	0.824
主梁 4	18.65	74.76	1.362	4.39	49.43	0.792
主梁 5	17.52	70.23	1.279	4.82	40.96	0.659
主梁 6	13.83	34.68	0.709	5.67	27.24	0.458

注: 表中主梁序号从底至顶分别为主梁 1、主梁 2、...、主梁 5、主梁 6

反向挡水工况两种计算结果拉应力、压应力及变形的比值和比值的平均数。正向挡水工况拉应力  $\sigma_{T2}/\sigma_{T1}$  在 22% ~ 41% 范围内, 平均为 28.96%; 压应力  $\sigma_{C2}/\sigma_{C1}$  在 57% ~ 79% 范围内, 平均为 66.73%; 变形  $f_2/f_1$  在 49% ~ 65% 范围内, 平均为 57.15%;

表 2 反向挡水工况传统强度理论与三维有限元法计算结果

Table 2 Calculated results from the traditional strength theory under reverse water retaining condition and three dimensional finite element method

主梁位置	传统强度理论法			三维有限元法		
	拉应力 $\sigma_{T1}/\text{MPa}$	压应力 $\sigma_{C1}/\text{MPa}$	变形 $f_1/\text{mm}$	拉应力 $\sigma_{T2}/\text{MPa}$	压应力 $\sigma_{C2}/\text{MPa}$	变形 $f_2/\text{mm}$
主梁 1	46.63	21.48	0.951	30.26	11.53	0.604
主梁 2	83.82	20.91	1.527	38.44(56.2)	12.3(22.8)	0.674
主梁 3	79.29	19.78	1.445	40.63	9.67(16.72)	0.741
主梁 4	74.76	18.65	1.362	39.76	8.97(18.23)	0.714
主梁 5	70.23	17.52	1.279	33.34	11.31(21.8)	0.595
主梁 6	34.68	13.83	0.709	5.67	23.03	0.475

注: 表中数值为主梁跨中应力与变形计算值, 括号为主梁应力的最大值。

反向挡水工况拉应力  $\sigma_{T2}/\sigma_{T1}$  在 46% ~ 65% 范围内, 平均为 46.50%; 压应力  $\sigma_{C2}/\sigma_{C1}$  在 49% ~ 167% 范围内, 平均为 73.43%; 变形  $f_2/f_1$  在 45% ~ 67% 范围内, 平均为 54.15%。反向挡水工况时三维有限元计算的结果普遍大于正向挡水工况, 有些主梁的最大应力也不在主梁跨中, 原因是反向挡水时, 两侧边梁自身存在变形。顶主梁的应力比传统算法大(超过 1.5 倍), 主要因为三维计算时考虑了顶主梁楔形块的支承作用。

表 3 正、反向挡水工况传统强度理论与三维有限元法计算结果对比

Table 3 Calculated results from the traditional strength theory under forward and reverse water retaining conditions and three dimensional finite element method (%)

主梁位置	正向挡水工况			反向挡水工况		
	$\sigma_{T2}/\sigma_{T1}$	$\sigma_{C2}/\sigma_{C1}$	$f_2/f_1$	$\sigma_{T2}/\sigma_{T1}$	$\sigma_{C2}/\sigma_{C1}$	$f_2/f_1$
主梁 1	35.47	75.34	62.67	64.89	53.68	63.51
主梁 2	22.91	56.81	48.92	45.86	58.82	44.14
主梁 3	21.74	65.25	57.02	51.24	48.89	51.28
主梁 4	23.54	66.12	58.15	53.18	48.10	52.42
主梁 5	27.51	58.32	51.52	47.47	64.55	46.52
主梁 6	41.00	78.55	64.60	16.35	166.52	67.00
平均	28.69	66.73	57.15	46.50	73.43	54.15

## 5 结语

(1) 针对双向止水铸铁闸门的应变情况, 采用传统的薄板强度理论算法与三维有限元法的两种计算结果存在较大差异。三维有限元计算结果仅为传统强度理论算法的 30% ~ 73%, 传统强度理论算法相对比较保守, 如规范的要求控制允许应力与变形, 势必会加大闸门截面尺寸, 增加重量和制造成本。对计算结果的分析发现, 铸铁闸门的截面尺寸主要受变形控制的影响, 两种计算方法变形计算结果差异较大, 比值平均数 57.15% 和 54.15%, 最大为 67.00%; 规范要求控制在计算跨度  $l/1500$  内, 无疑是加大截面尺寸和增加重量的主要因素, 因此现行规范已不能完全满足目前铸铁闸门设计、制造加工与使用的要求。本文认为可适当降低变形控制的要求, 结合钢闸门主梁变形控制的要求设定在计算跨度  $l/1000$  内, 也不会造成闸门因变形而破坏, 达到应力

控制与变形控制基本相当。

(2) 闸门设计时应根据不同挡水水位情况对闸门的截面和主梁筋板位置进行优化,使得各主梁的应力与变形基本相等;有反向挡水要求的闸门应考虑顶底主梁上楔形块的支承作用,合理调整其截面尺寸,侧向楔形块的布置应尽量设计在横向主梁筋板位置,防止两侧边梁自身变形而加大主梁的应力和变形。考虑边梁自身变形与受剪力作用,应采取加强措施防止边梁与主梁破坏。

本文以 $2.0\text{ m}\times 2.5\text{ m}$ (宽 $\times$ 高)平板加筋型铸铁闸门进行计算对比,仅提供了一种计算对比的方法,而对于更多、更大孔口的闸门的应变情况和设计计算的简化方法,还有待进一步研究分析,以便为铸铁闸门设计规范的修订提供更多的依据。

#### 参考文献(References):

- [1] 江宁,王煦. 水利工程铸铁闸门应用研究[J]. 水利技术监督, 2011, (1): 52-54. (JIANG Ning, WANG Xu. Study on Application of Cast iron Gates in Water Resources Projects [J]. Technical Supervision in Water Resources, 2011, (1): 52-54. (in Chinese))
- [2] CJ/T 3006 1992, 供水排水用铸铁闸门[S]. (CJ/T 3006 1992, Cast iron Gate Valve for Water Supply and Drainage [S]. (in Chinese))
- [3] DB32/T 1712-2011, 水利工程铸铁闸门设计制造安装验收规范[S]. (DB32/T 1712-2011, Cast iron Gate Hydraulic Engineering Design and Manufacture Installation Acceptance Specification [S]. (in Chinese))
- [4] 刘天政,于秀香,王晶,等. 铸铁闸门的设计与使用[A]. 山东水利科技论坛 2006[C]. 2006: 540-543. (LIU Tianzheng, YU Xiuxiang, WANG Jing, et al. Design and Application of Cast iron Gate [A]. Shandong Province Water Conservancy Science and Technology BBS 2006[C]. 2006: 540-543. (in Chinese))
- [5] 任丰兰,方跃飞. 铸铁镶铜闸门门体三维有限元分析[J]. 农机使用与维修, 2011, (5): 47-49. (REN Fenglan, FANG Yuefei. Three Dimensional Finite Element Analysis of Cast iron Bronze Inlaid Gate Body [J]. Farm Machinery Using & Maintenance, 2011, (5): 47-49. (in Chinese))
- [6] 黄相才,赵广田,张启明. 铸铁闸门破坏试验的初步总结[J]. 郑州工学院学报, 1984, (1): 118-120. (HUANG Xiangcai, ZHAO Guangtian, ZHANG Qiming. Cast-iron Gate Failure Test of the Preliminary Summary [J]. Journal of Zhengzhou Institute of Technology, 1984, (1): 118-120. (in Chinese))
- [7] 张友谦. 关于供水、排水铸铁闸门标准的探讨[A]. 中国水污染防治技术装备论文集[C]. 2004: 228-230. (ZHANG Youqian. Discussion of the Standard of Cast iron Gate for Water Supply and Sewage System [A]. Collections of Papers for Chinese Water Pollution Control Technology and Equipment [C]. 2004: 228-230. (in Chinese))
- [8] 许春. 铸铁闸门在山区水库中的引用与推广[J]. 安徽农学通报, 2007, (19): 113, 74. (XU Chun. Cast iron Gate in a Mountainous Area in a Reservoir Reference and Promotion [J]. Journal of Anhui Agricultural Science Bulletin, 2007, (19): 113, 74. (in Chinese))
- [9] 张喜和,邹天利,于福俊. PGE型平面铸铁闸门与平板滑动钢闸门的应用比较[J]. 吉林水利, 2001, (4): 38-39. ZHANG Xihe, ZHOU Tianli, YU Fujun. Application Comparison of PGE Flat Slab Cast steel Gate and Flat Slab Slide Steel Gate [J]. Jilin Water Resources, 2001, (4): 38-39. (in Chinese))
- [10] 陈方亮,赵英杰,姜成启,等. 钢铁复合闸门、平面钢闸门及铸铁闸门的应用比较[J]. 河南水利与南水北调, 2012, (16): 187-188. (CHEN Fangliang, ZHAO Yingjie, JIANG Chengqi, et al. Composite Steel Gate, The Application of Plane steel Gate and Cast iron Gate Comparison [J]. Journal of Henan Water Conservancy and South North Water Diversion Project, 2012, (16): 187-188. (in Chinese))
- [10] 张达政,陈鸿汉,李海明,等. 浅层地下水卤代烃污染初步研究[J]. 中国地质, 2002, 29(3): 326-329. (ZHANG Dazheng, CHEN Honghan, LI Hai ming, et al. Halogenated Hydrocarbon Contaminants in Shallow Groundwater [J]. Geology in China, 2002, 29(3): 326-329. (in Chinese))
- [11] 刘晓丽,梁冰,薛强. 地下水环境中有机污染物迁移转化动力学模型的研究[J]. 工程勘察, 2003, (1): 24-28. (LIU Xiaoli, LIANG Bing, XUE Qiang. On the Dynamics Model of Organic Chemical Transport in Groundwater Environment [J]. Geotechnical Investigation & Surveying, 2003, (1): 24-28. (in Chinese))
- [12] 何江涛,史敬华,崔卫华,等. 浅层地下水氯代烃污染天然生物降解的判别依据[J]. 地球科学中国地质大学学报, 2004, 29(3): 357-362. (HE Jiangtao, SHI Jinghua, CUI Weihua, et al. Determining Criteria for Natural Biodegradation of Chlorinated Hydrocarbons in Shallow Wwater [J]. Earth Science Journal of China University of Geosciences, 2004, 29(3): 357-362. (in Chinese))
- [13] 邓韬. 石油类污染物在包气带中迁移转化研究[D]. 西安: 长安大学, 2010. (DENG Tao. Study on the Migration and Transformation of Oil-contaminants in Vadose Zone [M]. Xi'an: Chang'an University, 2010. (in Chinese))
- [14] 何江涛,程东会,韩冰,等. 浅层地下水氯代烃污染天然衰减速率的估算[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 140-144. (HE Jiangtao, CHENG Donghui, HAN Bing, et al. Estimation of Natural Attenuation Rate of Chlorinate Solvents Contamination in Shallow Groundwater [J]. Earth Science Frontiers, 2006, 13(1): 140-144. (in Chinese))

(上接第 68 页)