



有限元分析及应力配筋法 在大型复杂混合式船闸结构设计中的应用

龙丽吉^{1,2}, 康海贵¹, 高鑫林³

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁大连 116024; 2. 重庆交通大学 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074; 3. 中交二航局第二工程有限公司, 重庆 401121)

摘要: 通过有限元方法分析了复杂地质条件下的混合式船闸, 主要模拟了在正常使用工况和检修工况下, 地基、闸室结构、闸墙后回填相互作用系统的受力特征和变形特征。再根据有限元分析结果, 用应力配筋法对复杂的闸室结构进行配筋分析。阐述了应力配筋法的理论依据以及与有限元方法组合应用的具体步骤和分析实例。

关键词: 有限元; 混合式船闸; 应力配筋

中图分类号: U 641.2

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2013)08-0141-06

Application of finite element analysis and stress reinforcement method for structural design of large-scale hybrid ship lock

LONG Li-ji^{1,2}, KANG Hai-gui¹, GAO Xin-lin³

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. Chongqing Southwestern Hydro Engineering Research Institute for Waterway, Chongqing 400016, China;

3. China Communications 2nd Navigational Bureau 2nd Engineering Co., Ltd., Chongqing 400016, China)

Abstract: Hybrid lock on complex geological conditions is analyzed by the finite element method. The characteristics of mechanical properties and deformation behavior among the foundation, lock chamber and back-filled are simulated. Based on the analysis results, we apply the stress reinforcement method to design the lock structure. Furthermore, we expound the theoretical basis and concrete steps and examples when it is combined with the finite element analysis method.

Key words: finite element; hybrid ship lock; stress reinforcement

混合式船闸应用于复杂地质条件下, 常用于开挖岩石山体中, 适用于下部承载能力好、岩性完整, 上部为土体或软岩的地质条件。混合式船闸上部采用重力式, 下部采用衬砌式结构, 结构断面因地制宜, 通常情况下都是异型断面, 断面结构形式随着岩石地基的条件而发生变化^[1]。由于船闸结构与岩石地基浇筑成为一个整体, 船闸结构与基础之间的相互作用也极大的影响着船闸结构的受力特征, 同时船闸上部重力式和下部衬砌

式之间的工作机理也不是很明确, 就造成了分析过程中遇到复杂的边界条件, 在这种情况下采用传统的计算方法很难准确计算这种形状不规则的结构应力状态, 给设计和使用造成了极大的困扰^[2-4]。

有限元数值计算方法由于其强大的非线性功能, 可以方便地解决复杂边界条件、复杂荷载条件、复杂接触条件的计算问题, 本文通过建立基础、混合式闸墙、墙后回填的联合有限元模型, 模拟混合式闸墙在不同工作状态下的内力分布及

收稿日期: 2013-01-15

作者简介: 龙丽吉(1985—), 女, 工程师, 从事港口结构与基础研究。

变形特征，并同规范中的简化设计方法做了对比分析。

1 工程背景

湄公河莎拉康水电站位于老挝境内湄公河干流梯级电站的第5级，电站是一座发电为主，兼顾航运、过鱼等综合效益的水电站枢纽。电站枢纽工程总库容9.87亿m³，根据GB 50201-94《防洪标准》的规定，该工程永久挡水建筑物和泄水建筑物设计洪水重现期为500 a，校核洪水重现期为2 000 a，考虑到船闸是水电站枢纽挡水建筑物的一部分，因此防洪标准按500 a一遇洪水设计，2 000 a一遇洪水校核。设计船闸为500吨级船闸，尺寸为120 m×12 m×4 m。莎拉康枢纽的总平面布置方案见图1。

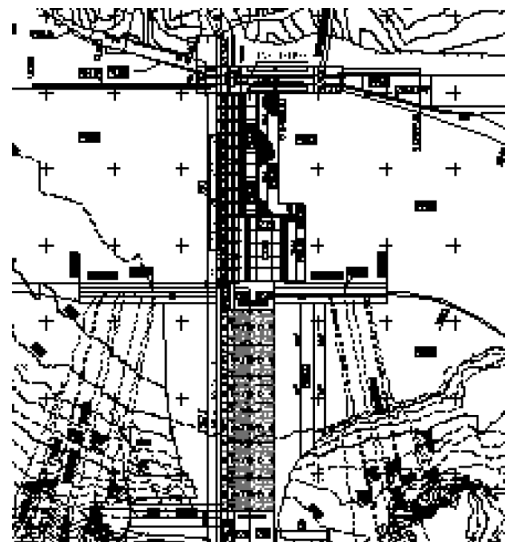


图1 枢纽总平面布置

2 工程地质及结构方案

工程所在区域第四系散层覆盖面积约占85%~90%，成因类型主要有残坡积及冲积层。出露的基岩以砂岩、板岩为主，完整程度相对较高、多相当于Ⅲ级岩体，局部有Ⅱ级岩体，在最低基岩顶板高程170~173 m，以弱-微风化岩体为主。岩石饱和抗压强度应在45~60 MPa，抗拉强度不低于2 MPa。微新岩体变形模量可达8~16 GPa，

弱风化岩体变形量3~8 GPa，岩/岩抗剪断峰值不低于 $f' = 0.9$ ， $c' = 0.8$ MPa。

船闸结构方案见图2，总高度35 m，下部和基岩浇筑为一体，下墙底宽3 m，上墙底宽10 m，墙顶宽4 m，船闸闸室宽度为12 m，上墙后端原地貌开挖后回填石渣。闸室底高程为189.00 m，船闸的工作水位分别为上游最高通航水位220 m；上游最低通航水位219 m；下游最高通航水位213.36 m；下游最低通航水位199.41 m；下游最大通航水位差13.35 m；下游检修水位200.92 m；上下游最大通航水位差20 m。

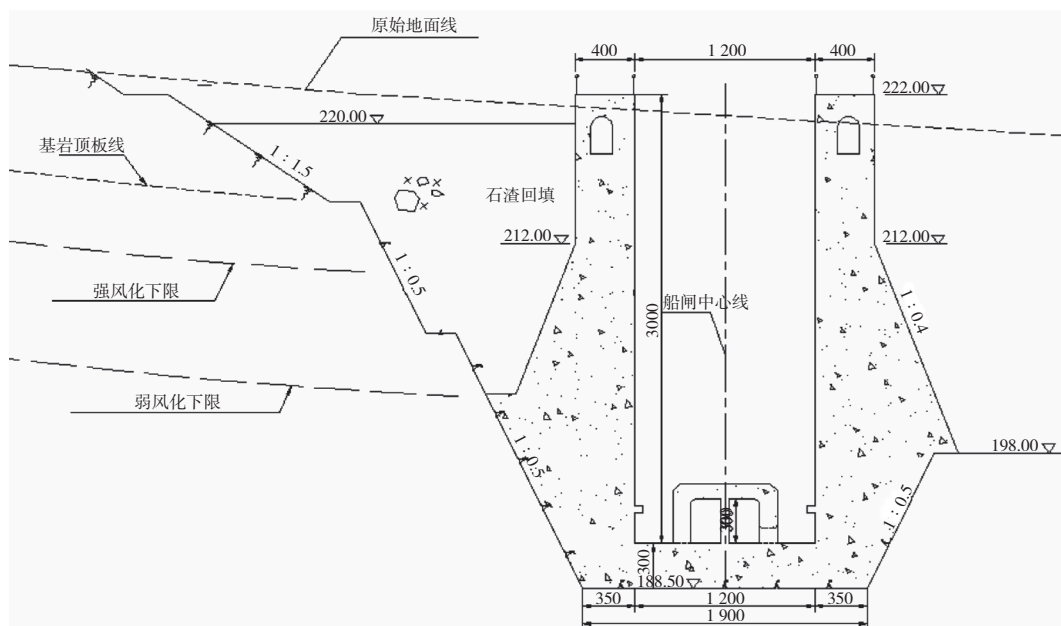


图2 闸室结构方案

3 应力配筋理论

有限元已经广泛应用在工程各个领域之中,但在工程中应用弹性有限元计算出来的应力结论指导复杂实体结构配筋的应用还很少。《水工钢筋混凝土结构设计规范》中对弹性应力配筋法作了原则性的说明^[5-6]。对于非杆系结构,在由弹性力学方程或通过模型试验得出结构在工作阶段的弹性应力图形后,按照下述原则配筋:当应力图形偏离线性分布较远时,可按照下列公式计算受拉钢筋:

$$T \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.6T_c + f_y A_s) \quad (1)$$

$$T = bA = b \int_{oa} \sigma dy \quad (2)$$

$$T_c = bA_c = b_c \int_{oh} \sigma dy \quad (3)$$

式中: T 为由荷载设计值 σ 确定的弹性总拉力, $T = Ab$; T_c 为混凝土承担的拉力, $T_c = A_c b$, A_c 为截面主拉应力在配筋方向投影图形中拉应力值小于混凝土轴心抗拉强度设计值 f_t 的图形面积, 见图3; f_t 为钢筋抗拉强度设计值; γ_d 为钢筋混凝土结构的结构系数。

同时,混凝土承担的拉力 T_c 不宜超过总拉力 T 的30%, 当弹性应力图形的受拉区高度大于结构截面高度的2/3时, T_c 等于零。

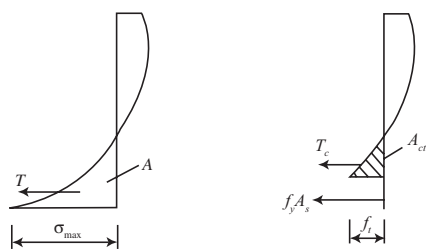


图3 按弹性应力配筋图

4 工况分析及模型

1) 计算工况。

本文计算了正常运行工况、完建工况,检修工况、设计洪水工况、校核洪水工况的荷载组合见表1。

闸室受力主要有结构自重、土体自重、土体产生的土压力,上部均载产生的土压力,墙前的静水压力,闸室底板上的浮托力以及通过船闸船舶的系缆力等。从工况表中可以看出,比较有代

表1 工况荷载组合

工况	自重	水重	水压力	土压力	土重	船舶力	扬压力	上游水位/m	下游水位/m
正常	√	√	√	√	√	√	√	220.00	205.05
完建	√			√	√		√		210.00
检修	√		√	√	√		√	220.00	200.22
设计洪水	√	√	√	√	√		√	220.20	219.53
校核洪水	√	√	√	√	√		√	221.50	220.59

表性的工况为正常运行工况和完建工况。本文主要给出这两种工况有限元分析的过程和结果。

2) 有限元模型。

有限元模型见图4。

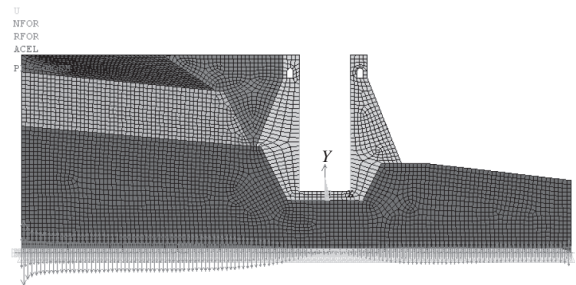


图4 有限元模型

由于船闸结构设计规范是将各部分分别独立出来进行验算,没有考虑闸室、地基、后方回填结构之间的相互作用及位移协调,使计算结果和实际受力状态相差较大。本文借助于有限元分析方法,很好地解决了这种边界条件复杂和接触情况复杂的结构。用ANSYS有限元软件建立了闸室结构、地基、墙后边坡及回填量的整体模型,闸室结构放在微风化岩内。岩土结构考虑弹塑性材料,采用M-C库伦准则,模型底端约束 x, y 方向位移,模型两侧约束 y 方向位移。闸室和地基的接触,考虑到结构之间不可能出现较大的相对位移,接触面之间满足变形协调和连续,因此接触采用共用绑定来协调变形。

3) 材料参数。

材料参数见表2。

表2 材料参数

材料	弹模/MPa	泊松/比	密度/($kg \cdot m^{-3}$)	粘聚力/kPa	内摩擦角/($^\circ$)
混凝土	2.9×10^4	0.16	2 400		
回填料	1.3×10^2	0.25	2 300	15	40
微风化岩	1.0×10^4	0.25	2 600	1 890	45
中风化岩	8.0×10^3	0.25	2 300	900	40
面层覆土	1.4×10^2	0.30	1 900	12	30

4) 荷载条件。

外力考虑作用在闸室上的水压、闸室底板上的浮重力，闸室内的水压、结构自重和墙后土重、墙后土体传来的土压力通过结构和土体的接触传递，墙顶考虑20 kN/m²的施工期施工机械和材料堆放荷载、正常工作工况下考虑船舶系缆力。

5 有限元分析结论

1) 工况1：船闸正常使用时的结构受力。

① 整体结构位移变形。

如图5和6所示，在该种工况下位移最大处产生在闸室挡墙开挖后回填石料区，为13 mm。对于闸室结构在侧发生墙体向外侧变形，最大变形为4.3 mm，满足规范和使用要求。

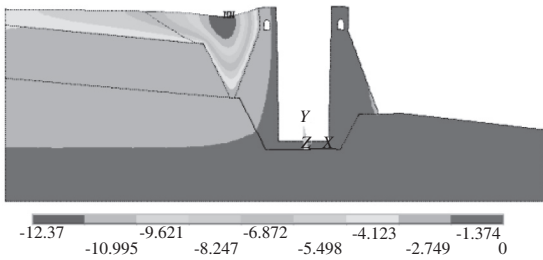


图5 结构X方向位移云图(单位: mm)

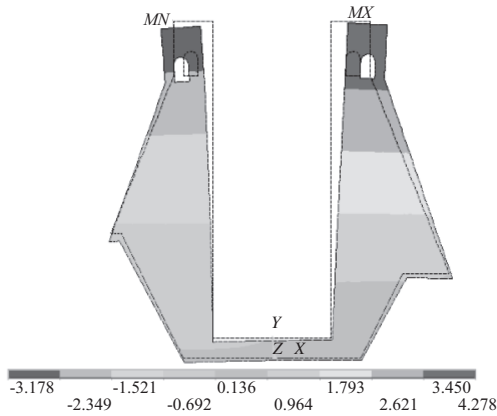


图6 结构Y方向位移云图(单位: mm)

② 整体结构位移变形。

图7为最大主应力分布(拉应力)，最大值出现在挡墙前趾及底板上，最大为1.97 MPa，大于C30混凝土抗拉强度(0.95 MPa)，因此对结构考虑配筋。

最小主应力分布(压应力)见图8，最小主应力出现在左侧挡墙前趾及右侧挡墙后趾，最大

压应力为4.53 MPa < 30 MPa，满足地基承载能力的要求。

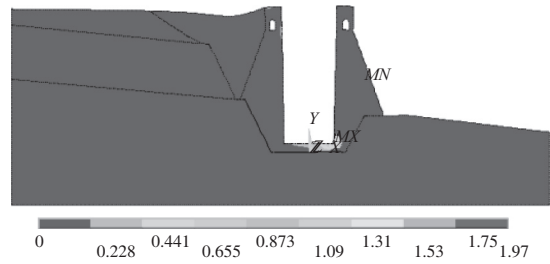


图7 最大主应力云图(单位: MPa)

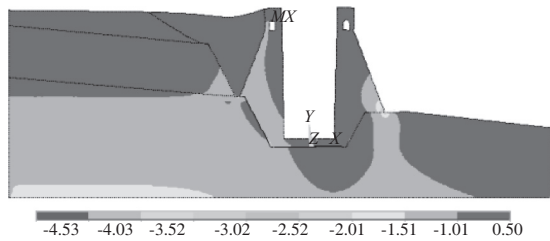


图8 最小主应力云图(单位: MPa)

2) 工况2：船闸检修时的结构受力。

① 整体结构位移变形。

如图9所示，在该工况下闸室墙体发生向内侧变形，最大变形为2 mm。

② 整体结构应力云图。

图10为最大主应力分布(拉应力)，在船闸检修工况时拉应力出现在挡墙后趾及底板上，

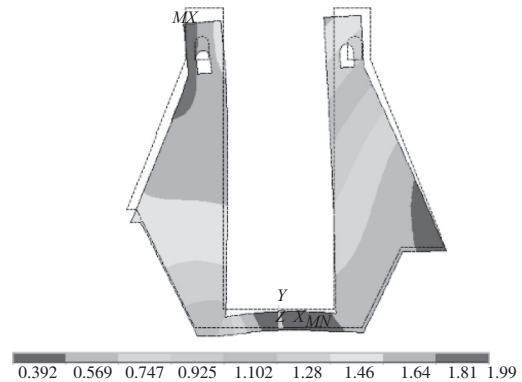


图9 闸室变形云图(单位: mm)

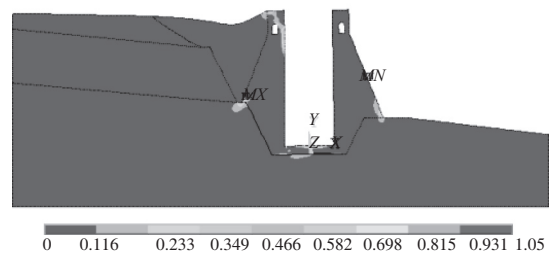


图10 最大主应力云图(单位: MPa)

最大为 1.05 MPa, 大于 C30 混凝土抗拉强度为 0.95 MPa, 考虑配筋解决或者增大截面尺寸。

最小主应力分布见图 11 (压应力), 出现在两侧挡墙前趾, 最大压应力为 4.28 MPa < 30 MPa, 满足地基承载能力的要求。同时小于混凝土压应力 10.5 MPa, 满足要求。

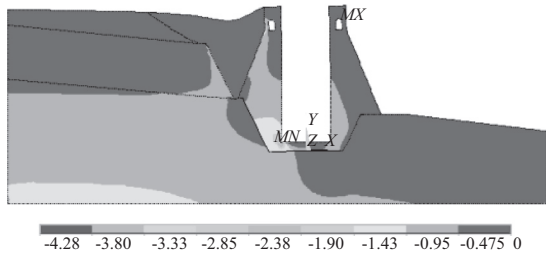


图 11 最小主应力云图 (单位: MPa)

3) 计算结果。

上述过程给出了正常运行和完建两种典型工况的计算过程, 其余工况的计算结果见表 3。

表 3 理论计算值与有限元计算值对比分析

工况	项目	理论计算值/ MPa	有限元计算值/ MPa
正常	基底最大拉应力	1.79	1.97
	基底最大压应力	4.45	4.53
完建	基底最大拉应力	1.12	1.05
	基底最大压应力	3.89	4.28
检修	基底最大拉应力	1.79	1.96
	基底最大压应力	4.45	4.52
设计洪水	基底最大拉应力	0.79	0.74
校核洪水	基底最大拉应力	0.81	0.75
	基底最大压应力	3.01	2.79

6 应力配筋法分析复杂船闸配筋及裂缝宽度

1) 应力配筋。

通过对比规范计算方法和有限元计算方法可见, 按照规范计算方法, 应力最大值为 1.79 MPa, 出现在基础底面, 有限元计算的最大拉应力值为 1.97 MPa, 出现挡墙和底板连接处及墙顶电缆及观测廊道。由应力分布可见, 部分截面应力超过了 C30 混凝土抗拉强度为 0.95 MPa, 因此对结构进行应力配筋。根据上述 5 种工况的计算结果, 选择比较危险工况正常运行工况, 选取了比较关键的 A-A, B-B, C-C 断面, 提取应力分布, 根据应力分

布配筋并计算结构裂缝宽度。图 12 给出了提取应力截面图。

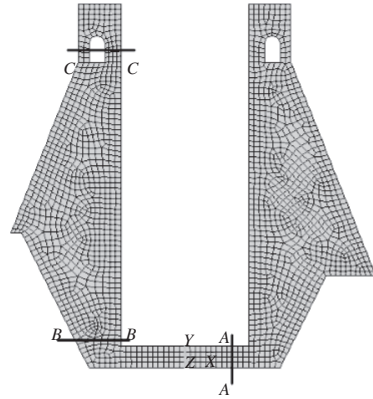


图 12 提取应力截面图

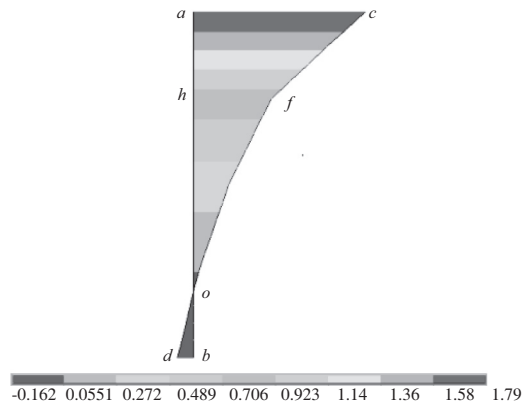


图 13 A-A 断面应力截面 (单位: MPa)

根据 A-A 断面应力截面 (图 13) 得: 此处由于受拉区高度大于结构高度的 2/3, 故取 $T_c=0$, 结构上的拉应力假设全部由钢筋承担:

$$T = bA = b \int_{aoc} \sigma dy = 1.06 \times 10^6 \text{ N}$$

$$A_s \geq \frac{T \gamma_d}{f_y} = 5047.6 \text{ mm}^2 / \text{延米}$$

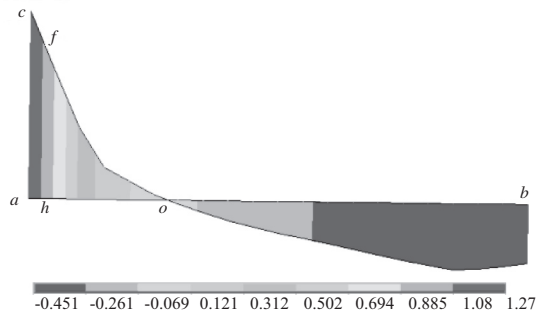


图 14 B-B 断面应力截面 (单位: MPa)

根据应力分布 (图 14) 得:

$$T = bA = b \int_{aoc} \sigma dy = 4.8 \times 10^5 \text{ N}$$

$$T_c = bA_c = b \int_{ahfc} \sigma dy = 1.2 \times 10^5 \text{ N}$$

$$A_s \geq \frac{(T - T_c)\gamma_d}{f_y} = 1714.3 \text{ mm}^2/\text{延米}。$$

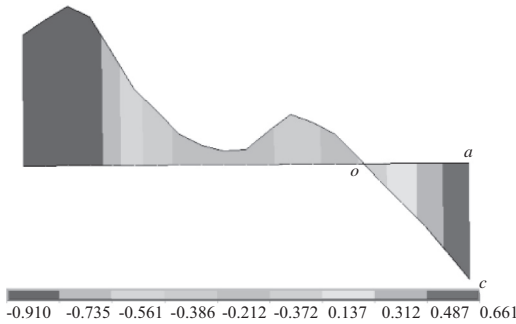


图15 C-C断面应力截面 (单位: MPa)

C-C断面应力截面见图15。断面C-C在闸室顶部廊道下方，考虑到该处有廊道的形成，混凝土不承担拉应力，均由钢筋承担，以保证结构的安全性。

$$T = bA = b \int_{aoc} \sigma dy = 3.2 \times 10^5 \text{ N}$$

$$A_s \geq \frac{T\gamma_d}{f_y} = 1523.9 \text{ mm}^2/\text{延米}$$

2) 裂缝宽度计算。

在确定配筋量后，还要控制裂缝宽度，对于船闸结构，裂缝宽度影响着结构的安全性和耐久性。船闸的工作环境为II类，允许的裂缝最大宽度为0.25 mm。裂缝宽度的计算公式为^[6]：

$$w_{\max} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{\sigma_{ss}}{E} (3c + 0.10 \frac{d}{\rho_{te}}) \quad (4)$$

结构配筋及裂缝宽度验算见表4。

表4 结构配筋及裂缝宽度验算

断面	总拉力/ kN	配筋		钢筋应力/ MPa	裂缝宽度/ mm
		数量	面积/cm ²		
A-A	1 060	12φ34	108.95	93.70	0.202
B-B	480	12φ22	45.61	105.23	0.204
C-C	320	12φ22	45.61	70.16	0.136

7 结论

通过对闸室结构-地基-闸墙后方回填的整体建模，充分考虑了结构和土体间的相互作用的影响，并与理论计算方法的计算结果进行对比

分析，可以得出：有限元方法更加适合复杂的结构和地质情况，能够反映结构各个细部的受力特征，有助于设计者优化结构。同时对比两种方法的计算结果可见，有限元的应力计算结果与传统方法在地基处的应力最大值差距不大，但是有限元更加能反应出局部形状突变的部位的应力分布情况，适用性更加强。

通过主要工况的计算结果可见，对于该种混合式闸室结构，可以看见底板与挡墙的连接处、底板处、混合式闸墙上墙后趾与基础接触处、结构预留孔洞处出现应力集中分布，是结构设计中应当重点考虑的位置。

闸墙后方由于回填深度较深，并且回填厚度的不均匀，后期出现不均匀的沉降，因此在施工过程中应当注意回填料的碾压，后期要注意沉降的观测。

给出了应力配筋法对混合式闸室结构进行配筋分析和步骤，可见对于复杂不规则的结构，应用传统的钢筋混凝土计算方法对结构进行配筋很难实现，有限元方法和应力配筋法的组合应用很好地解决了这个难题。

参考文献：

- [1] 马杰, 赵真毅, 杨晓亮, 等. 大型干船坞多锚衬砌式坞墙结构的有限元分析[J]. 水运工程, 2008(12): 70-73.
- [2] 苏超, 姜弘道, 钱向东, 等. 三峡永久船闸衬砌墙结构及结构锚杆受力仿真分析[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 1999, 27(6): 25-29.
- [3] 缪吉伦, 张晓明, 张绪进. 巧式船闸闸底板结构有限元分析[J]. 重庆交通学院学报, 2006, 25(5): 149-151.
- [4] 陕亮, 徐跃之, 肖汉江. 三峡永久船闸混合式闸室墙接触问题数值分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008(2): 72-74.
- [5] 石广斌, 吴凯, 杨经会. 弹性应力配筋法的探讨及应用[J]. 水电站设计, 2003, 19(1): 36-39.
- [6] 杨金源. 基于三维有限元应力分析的厂房结构配筋和裂缝宽度设计[J]. 人民珠江, 2011(5): 12-14.

(本文编辑 武亚庆)