

# The Finite Element Analysis for Sluice Chamber Structure Based on ANSYS

Lifeng Wei, Xijian Liao

Ningbo City Water Resources and Hydropower Planning and Design Institute, Ningbo  
Email: [nbwlf@126.com](mailto:nbwlf@126.com)

Received: Apr. 4<sup>th</sup>, 2014; revised: Apr. 28<sup>th</sup>, 2014; accepted: May 5<sup>th</sup>, 2014

Copyright © 2014 by authors and Hans Publishers Inc.  
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).  
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

---

## Abstract

In order to complete the reinforcement design of lock chamber floor, we use 3D finite element analysis of the southern dike lock chamber in Meishan waterway under each working condition by using the ANSYS, calculate the lock chamber structure stress, and then select the maximum stress for reinforcement calculation. The calculated value of reinforcement ratio is lower than the standard value. Study shows that the lock chamber structure based on ANSYS finite element analysis can calculate each part of the complex stressing sluice chamber structure's stress, providing the basis for reinforcement; that has guiding significance for its design and optimization.

## Keywords

Sluice, Finite Element, ANSYS, Structural Stress, Reinforcement

---

# 基于ANSYS的水闸闸室结构有限元分析

魏立峰, 廖锡健

宁波市水利水电规划设计研究院, 宁波  
Email: [nbwlf@126.com](mailto:nbwlf@126.com)

收稿日期: 2014年4月4日; 修回日期: 2014年4月28日; 录用日期: 2014年5月5日

---

## 摘要

为了完成闸室底板配筋设计, 采用ANSYS对梅山水道南堤水闸闸室各工况进行三维模型的有限元分析,

计算闸室结构应力,进而选取应力最大值进行配筋计算,配筋率计算值低于规范值。研究表明,基于ANSYS对闸室结构进行有限元分析能够计算复杂受力的水闸闸室结构各部位应力,为配筋提供依据,对其设计及优化具有指导意义。

## 关键词

水闸,有限元,ANSYS,结构应力,配筋

## 1. 引言

有限元分析方法在水工建筑物的可靠度分析方面取得巨大成就[1][2],其在水闸结构分析的应用已经非常广泛。曹邱林等借助三维有限元软件 ABAQUS 对软基上的焦土港闸进行了计算,分析研究了不同闸内外水位情况下微桩群复合地基以及闸室结构的应力应变情况[3]。陈亚鹏等通过对崔家营航电枢纽泄水闸闸墩有限元分析,计算应力、位移数值并归纳出其变化规律,为泄水闸闸墩结构设计提供了依据[4]。满广生采用有限元对深孔闸的闸室进行了分析计算,根据空间板的分析理论,在厚薄板问题的受力计算基础上考虑了闸内力的作用[5]。

梅山水道位于宁波市北仑区梅山岛与穿山半岛之间,全长约 17 km,两侧分别为梅山港区和穿山港区。北仑梅山水道抗超强台风渔业避风锚地工程位于北仑区梅山岛西侧,由北堤及南堤组成,其中南堤西接洋砂山,东与在建的七姓涂围涂工程西大堤相连,长约 1027 m,布有配套出口水闸一座,规模为 8 m × 3 孔。

根据《水闸设计规范》(SL265-2001)规定,水闸结构应力分析应根据各分部结构布置型式、尺寸及受力条件等进行。受力条件复杂的大型水闸闸室结构宜视为整体结构采用空间有限单元法进行应力分析,必要时经结构试验验证。南堤闸工程等别为 2 级,属大(2)型水闸,水闸为双层结构,在各工况下受除自重和水压力外多种不同大小和方向的荷载作用,闸室基础为微桩群复合地基,桩体和地基土体协调变形[3],相对于纯土地基对闸底板应力分布影响更为复杂,因此有必要采用有限元法对此水闸应力分析。本文利用 ANSYS 有限元分析软件对南堤水闸结构进行数值模拟,分析其底板受力情况及工作状态,为结构配筋提供有效的依据。

## 2. 水闸基本设计参数

### 2.1. 荷载组合

设计水闸时,应将可能同时作用的各种荷载进行组合。荷载组合可分为基本组合和特殊组合两类。针对完建、正常蓄水位、设计洪水位、检修、最高挡水位工况,闸室所受荷载如表 1 所示。

### 2.2. 水位组合

梅山水道南堤闸外海  $P = 1\%$  设计高潮位为 4.64 m,  $P = 1\%$  设计低潮位为 -2.78 m; 多年平均高潮位 2.39 m, 平均潮位 0.68 m, 平均低潮位 -1.21 m; 水道内设计常水位 0.50 m (对应于正常洪水位情况), 排涝起排水位 0.00 m; 20 年一遇最高洪水位 2.21 m (对应于设计洪水位情况)。各工况对应的水位情况如表 2 所示。

## 3. 基于 ANSYS 有限元分析的闸室内力计算方法

在不同工况下对结构做配筋计算时,需要获得控制截面所承受的轴力和弯矩。但有限元软件只能直

**Table 1.** load combination table for stress analysis of locks lock chamber

**表 1.** 水闸闸室应力分析荷载组合表

荷载组合	计算工况	荷载
	完建情况	自重(+土压力)
基本组合	正常蓄水位情况	自重 + 水重 + 静水压力 + 扬压力 + 浪压力(+ 土压力)
	设计洪水位情况	自重 + 水重 + 静水压力 + 扬压力 + 浪压力(+ 土压力)
特殊组合	检修情况	自重 + 静水压力 + 扬压力 + 浪压力(+ 土压力)
	最高挡潮水位情况	自重 + 水重 + 静水压力 + 扬压力 + 浪压力(+ 土压力)

**Table 2.** The sluice's inside and outside water level under each calculation condition

**表 2.** 各计算工况采用的水闸内外水位

荷载组合	计算情况	南堤闸外海	水道内
	完建情况	不考虑	不考虑
基本组合	正常蓄水位情况	2.39 m	0.50 m
	设计洪水位情况	-2.78 m	2.21 m
特殊组合	检修情况	2.39 m	0.50 m
	最高挡潮水位情况	4.64 m	0.00 m

接提取单元节点上的内力、应力和位移等解答。因此，需要基于 ANSYS 路径映射原理[6]，采用 APDL 语言编制可计算结构任意截面的轴力和弯矩的程序，在此基础上进行截面配筋。具体步骤如下：

(1) 在截面上沿配筋方向建立主路径  $P$  和子路径  $r_i$ 。主路径  $P$  根据计算精度由  $n$  个点  $P_i (i = 1, 2, \dots, n)$  组成，然后在  $P_i$  上沿主路径  $P$  的法线方向建立子路径  $r_i$ ，并存储  $r_i$  的法线方向  $\{T_i\}$ 。子路径  $r_i$  根据计算精度划分为  $n$  段， $n + 1$  个点。

(2) 映射结果到子路径  $r_i$  上。将单元主应力  $S_1, S_2, S_3$  映射到子路径  $r_i$  上的各个点上。

(3) 计算子路径  $r_i$  的轴力和  $p_i$  点处弯矩。路径  $r_i$  上每个点上的轴力强度：

$$n_i = \sum_{i=1}^3 \{S_i\} \cdot \{T_i\} \quad (1)$$

$n_i$  沿着子路径  $r_i$  积分，得到路径  $r_i$  的轴力：

$$N_i = \int_0^{S_i} n_i dl \quad (2)$$

$P_i$  点处弯矩：

$$M_i = \sum_{i=1}^{n+1} N_i l_i \quad (3)$$

式中： $l_i$  为各点对应的路径  $r_i$  中点的距离。

(4) 绘制主路径  $P$  上的轴力弯矩图。依次在主路径上各个点  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$  上建立子路径  $r_i (i = 1, 2, \dots, n)$ ，重复上述步骤得到各个子路径的轴力  $N_i$  和点  $p_i (i = 1, 2, \dots, n)$  的弯矩  $M_i$ ，基于上述数据可进行截面配筋计算。

#### 4. 水闸三维有限元模型

南堤闸水闸底板厚 1.5 m，采用 C30 混凝土。底板垫层采用厚 0.1 m，采用 C15 混凝土。边墩厚 1.4

m (包括空箱壁厚度), 中墩厚 2 m, 缝墩厚 2.8 m, 采用 C35 混凝土。胸墙厚 0.4 m, 采用 C35 混凝土。钢筋均采用 HRB335 级。采用有限元法计算时, 水闸结构自重根据材料密度自动施加, 钢筋混凝土密度统一采用  $2500 \text{ kg/m}^3$ 。

根据水闸平面布置图确立的水闸结构分缝方式及结构对称原理, 将南堤水闸闸室各分为 A、B 两段进行建模。上部结构荷载通过垂直于水流方向的两段承重墙传递至闸室。闸室结构及基桩均采用实体单元 (SOLID92), 每根基桩底面中心建立 1 个水平弹簧单元和一个竖向弹簧单元 (COMBIN14), 弹簧刚度采用设计单桩刚度, 其中竖向刚度  $E_y \text{ 桩} = 8.9 \times 10^8 \text{ N/m}$ , 水平刚度  $E_x \text{ 桩} = 3.3 \times 10^7 \text{ N/m}$ 。本文对水闸闸室 B 段底板进行分析, 物理模型及对应的三维有限元模型如图 1、图 2 所示, 并将闸墩及胸墙分别进行编号。

南堤水闸闸室 B 段右侧与空箱结构相连, 空箱侧壁受静止土压力和负摩阻力作用; 左侧为缝墩分隔缝, 与闸室 A 段相隔, 取为自由表面。结构上部由承重墙承受上部建筑荷载, 由实体承台承受卷扬机自重荷载。结构下部与桩基固接。

## 5. 闸室结构应力分析

### 5.1. 承载力安全系数

根据《水工混凝土结构设计规范》(SL191-2008), 承载能力极限状态计算时, 钢筋混凝土的承载力安全系数  $K$  应不小于表 3 的规定。结构在检修期的承载力计算, 安全系数  $K$  应按表中基本组合取值; 对校核水位的承载力计算, 安全系数  $K$  应按表中偶然组合取值。

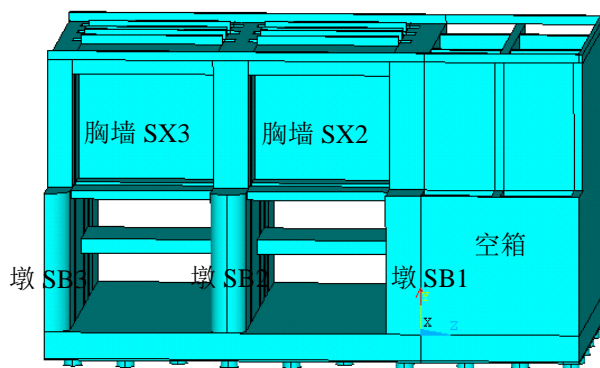


Figure 1. Physical model of South dam sluice chamber B  
图 1. 南堤水闸闸室 B 段物理模型

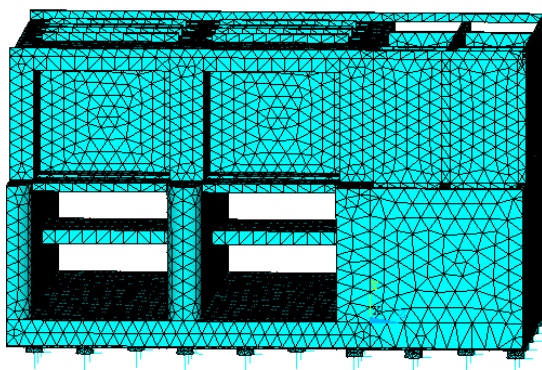


Figure 2. The finite element model of South dam sluice chamber B  
图 2. 南堤水闸闸室 B 段有限元模型

本工程水闸建筑物级别为 2 级，不同工况下钢筋混凝土构件的承载力安全系数取值如表 4 所示。

### 5.2. 内力分析结果

在闸墩竖向压力和基桩反力共同作用下，水闸闸室底板主要承受垂直于水流方向的弯矩作用。规定以底板底面受拉为正弯矩，以底板顶面受拉为负弯矩。以单排(或单列)桩的中心线所在截面为控制截面计算其截面弯矩。据试算，在顺水流方向上，闸室底板所受弯矩很小，可仅按构造要求配置分布钢筋。

各工况下，南堤水闸闸室 B 段的底板在垂直水流方向上所受弯矩如表 5 所示。检修工况下该段底板截面的正弯矩达到最大值，完工况下该段底板截面的负弯矩设计值达到最大值。

采用 ANSYS 软件的后处理功能，对南堤 B 段底板应力进行可视化处理，底板结构平面及正常水位工况底板顶面应力分布如图 3~图 6 所示。根据图示结果可知，水闸底板顶面应力总体受底板上部结构——闸墩和空箱箱壁影响，闸墩及空箱箱壁正下方应力小于墩壁间区域应力。此外，墩壁间区域应力出现集中的圆形应力集中区块，这是受到了微桩群基础影响所致。因为微桩群复合地基中桩承担了大部分的上部荷载[3]，所以闸底板承受地基反力集中在各桩与底板底面交接处，底板底面的力引起了闸底板顶面应力的增加，由此底板顶面应力产生了按桩基分布的圆形应力集中区块。由于微桩群各桩对闸底板的反力分布不均，形成了闸底板顶面应力圆形应力集中区块形状和大小不一致的现象。综上所述，采用 ANSYS 对上部受复杂荷载、下部由微桩群基础承载的闸底板进行有限元分析，计算其应力分布的状况，结果合理，具备可靠性。

### 6. 配筋分析

据计算，各工况下底板截面受压区计算高度  $x$  不满足： $x \geq 2a'_s$ ，式中  $a'_s$  为受压钢筋合力点至受压区

**Table 3.** The bearing capacity of concrete structural components safety factor K (Design Specification for Sluice (SL265-2001))

**表 3.** 混凝土结构构件的承载力安全系数 K (《水闸设计规范》(SL265-2001))

水工建筑物级别	1		2, 3		4, 5	
荷载效应组合	基本组合	偶然组合	基本组合	偶然组合	基本组合	偶然组合
钢筋混凝土结构	1.35	1.15	1.20	1.00	1.15	1.00

**Table 4.** Safety factor K values under different conditions (Design Specification for Sluice (SL265-2001))

**表 4.** 不同工况下安全系数 K 的取值(《水闸设计规范》(SL265-2001))

工况	完工	正常蓄水位	设计洪水位	检修	最高挡潮水位
安全系数 K	1.20	1.20	1.20	1.20	1.00

**Table 5.** The plate bending moment of South dam sluice chamber B (unit: kN·m)

**表 5.** 南堤水闸闸室 B 段底板弯矩(单位: kN·m)

工况	完工	正常蓄水位	设计洪水位	检修	最高挡潮水位
截面最大正弯矩标准值 $M^+$	5320	5100	4566	5705	6393
截面最大负弯矩标准值 $M^-$	-12,668	-10,557	-10,578	-6107	-11,755
截面最大正弯矩设计值 $KM^+$	6384	6120	5479	6846	6393
截面最大负弯矩设计值 $KM^-$	-15,202	-12,668	-12,694	-7329	-11,755

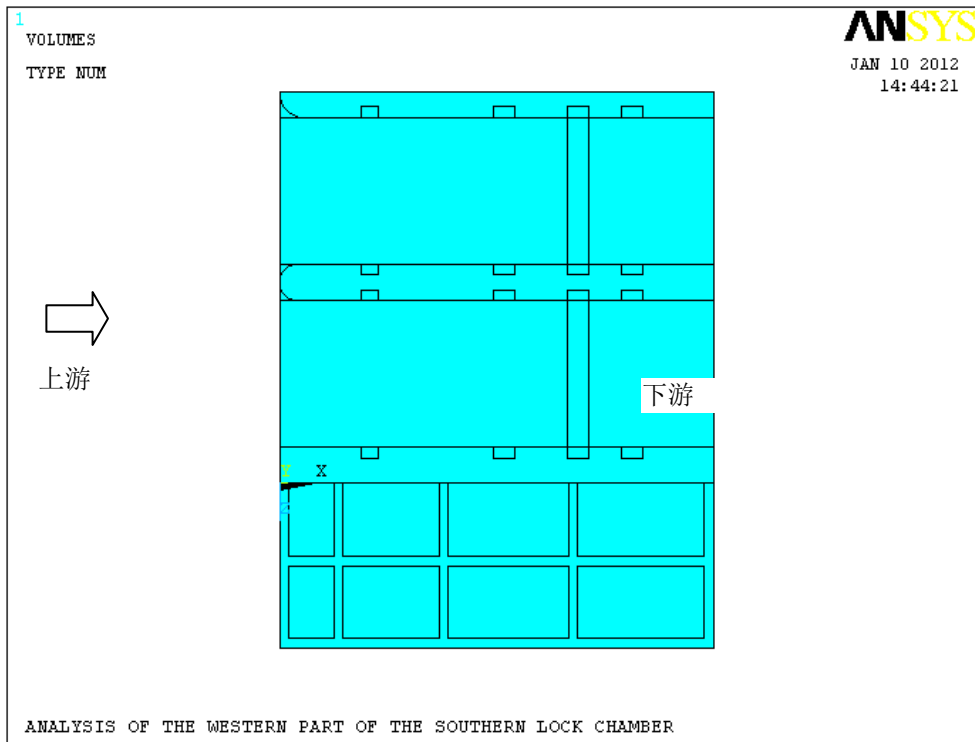


Figure 3. The floor vertical view of South section B  
图 3. 南 B 段底板俯视图

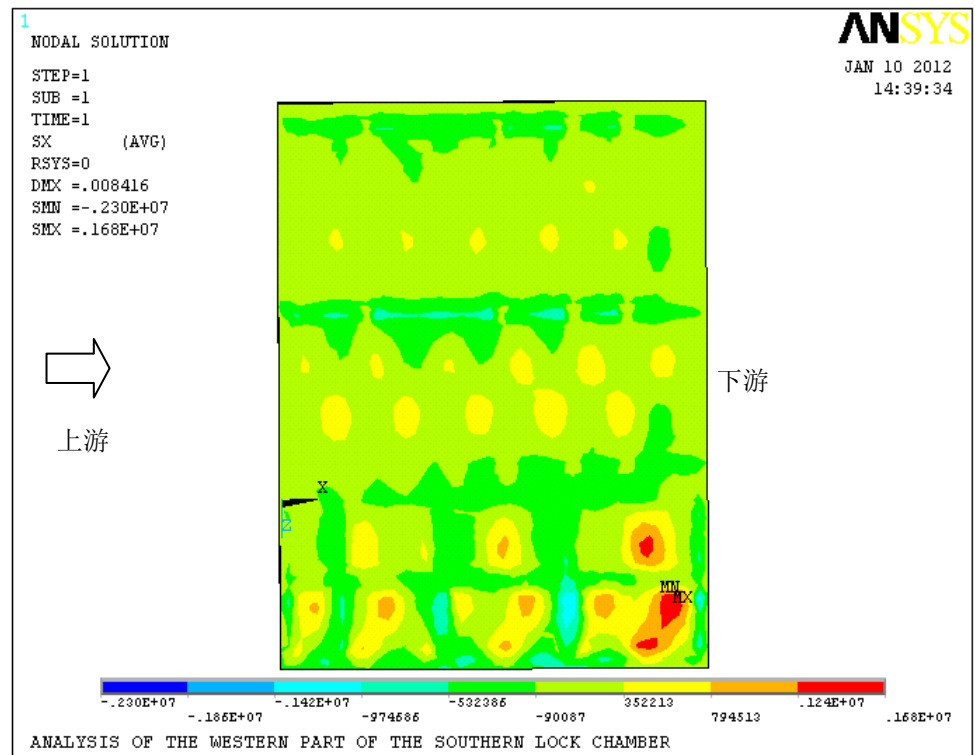


Figure 4. X normal stress at the top of the South section B's floor (normal working condition of water level, to the right level is positive)  
图 4. 南 B 段底板顶面 X 向正应力(正常水位工况, 水平向右为正)

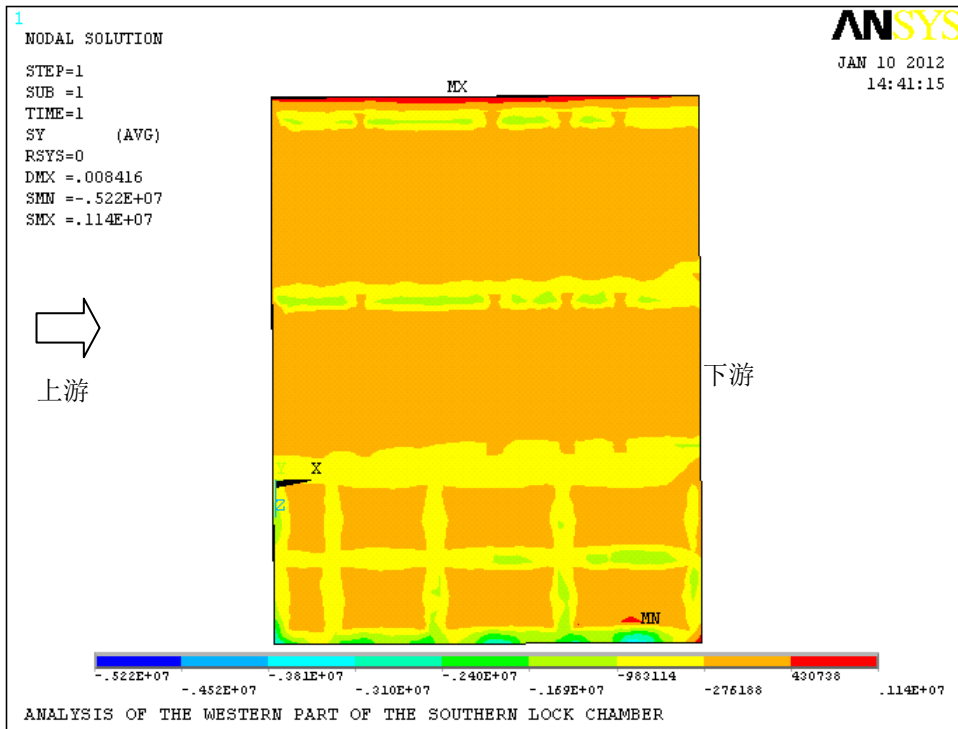


Figure 5. Y normal stress at the top of South section B's floor (normal working condition of water level, perpendicular to the paper face is positive)

图 5. 南 B 段底板顶面 Y 向正应力(正常水位工况, 垂直纸面向外为正)

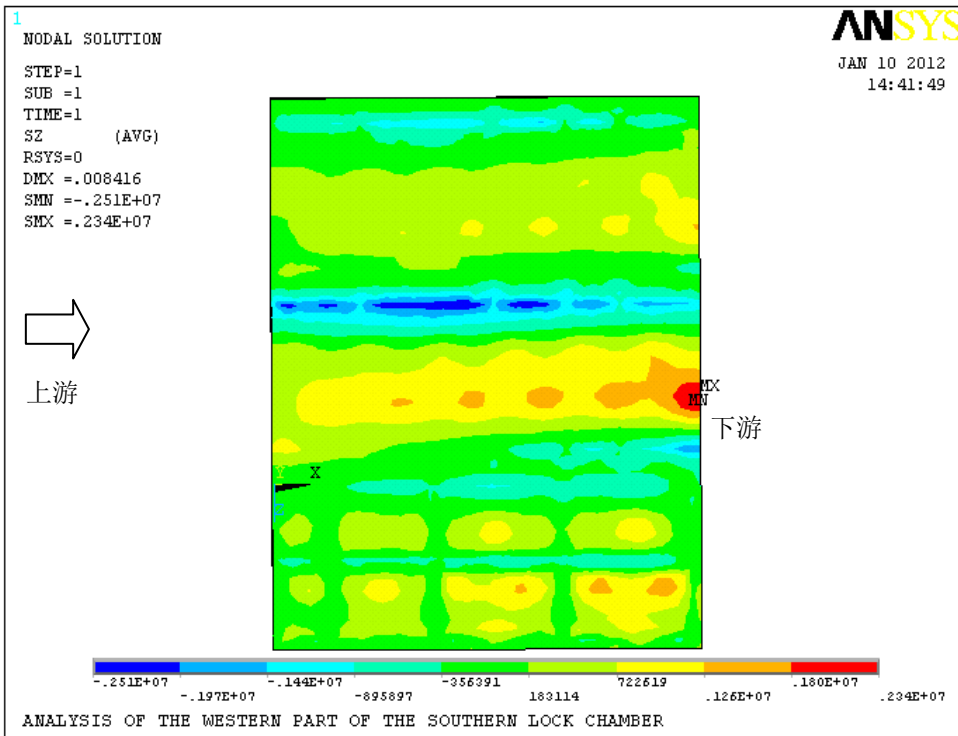


Figure 6. Z normal stress of South section B's floor (normal working condition of water level, the vertical downward is positive)

图 6. 南 B 段底板顶面 Z 向正应力(正常水位工况, 竖直向下为正)

边缘的距离。正截面受弯承载力可按下式计算：

$$KM \leq f_y A_s (h_0 - a_s') \quad (4)$$

式中,  $K$  为结构承载力安全系数, 按表 4 采用;  $M$  为截面弯矩标准值;  $f_y$  为钢筋抗拉强度设计值( $\text{N}/\text{mm}^2$ );  $A_s$  为纵向受拉钢筋的截面面积( $\text{mm}^2$ );  $h_0$  为截面有效高度( $\text{mm}$ )。

计算结果如表 5 所示, 选取各工况下截面弯矩设计值的最大值计算南堤闸底板配筋率, 截面底面和顶面配筋率分别为 4% 和 10%, 而根据《水工混凝土结构设计规范》(SL191-2008), 受弯板最小配筋率为 15%, 因此可结合施工方便各段闸室底板可按最小配筋率 15% 进行配筋。采用 ANSYS 对复杂闸室结构应力进行有限元分析, 能够计算出整个闸室的应力及位置, 进而根据应力值对闸室具体部位进行配筋计算, 结合相关规范要求, 既能够保证配筋满足最小配筋率要求, 又能优化各部位配筋。

## 7. 结论

本文根据南堤水闸各工况下的受力情况, 采用 ANSYS 进行闸室结构应力的有限元分析, 计算出闸室结构的应力大小及分布, 进而对比各工况的闸底板最大应力, 选取其中最大值对底板进行钢筋配置, 最后对比配筋率计算值和规范值, 得到了以下结论:

(1) 基于 ANSYS 路径映射原理, 采用 APDL 语言编制了可计算结构任意截面的轴力和弯矩的程序。

(2) ANSYS 有限元分析方法能够有效模拟计算出受力复杂的水闸底板的最大应力及其位置, 为水闸底板配筋提供可靠的依据。

(3) 有限元分析不仅能找出水闸底板的最大应力, 而且能计算出底板的任意部位的应力值, 设计人员根据不同部位的应力值进行水闸底板配筋的深化设计, 减少钢筋用量, 对工程经济具有实际意义。

## 参考文献 (References)

- [1] 武清玺, 吴世伟, 吕泰仁 (1990) 基于有限元法重力坝可靠度分析. *水利学报*, 1, 58-64.
- [2] 潘家铮 (1990) 水工隧洞和调压室. 水利电力出版社, 北京.
- [3] 曹邱林, 孟怡凯 (2013) 微桩群复合地基水闸闸室结构有限元分析. *人民长江*, 4, 31-34.
- [4] 陈亚鹏, 周俊波 (2006) 崔家营航电枢纽泄水闸闸墩有限元分析. *中国农村水利水电*, 12, 104-106.
- [5] 满广生 (2003) 水闸设计及闸室结构的有限元分析. 硕士论文, 合肥工业大学, 合肥.
- [6] 美国 ANSYS 公司北京办事处 (1998) ANSYS 基本过程分析指南. 北京.