

高耸钢筋混凝土进水塔结构抗震 稳定性分析与安全评估

赵海涛¹, 骆勇军¹, 王潘绣², 岳春伟¹

(1. 河海大学 土木与交通学院, 江苏 南京 210098; 2. 金陵科技学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 为验算某水电站进水塔的抗震稳定性, 基于 ANSYS 软件, 采用振型分解反应谱法研究了进水塔结构在三向地震作用下的动力响应。然后将动力计算结果与静力计算结果叠加, 通过 ANSYS 的二次开发技术求得不同工况下塔基面轴力、剪力和弯矩, 进而分析了进水塔结构的抗滑、抗倾覆、抗浮稳定性。结果表明此进水塔的抗震稳定性符合规范要求, 可供同类工程的设计与研究参考。

关键词: 进水塔; 稳定性; 抗震; 有限元法

中图分类号: TU375.2

文献标识码: A

文章编号: 1672-1144(2012)06-0106-04

Seismic Stability Analysis and Safety Assessment for Reinforced Concrete Intake Tower Structure

ZHAO Hai-tao¹, LUO Yong-jun¹, WANG Pan-xiu², YUE Chun-wei¹

(1. College of Civil and Traffic Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;

2. Jinling Institute of Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 211169, China)

Abstract: In order to check the seismic stability of the intake tower in a hydropower station, ANSYS is used to analyze the dynamic response of the intake tower under three dimensional earthquakes through mode-superposition response spectrum method. And then, by the superposed results of dynamical and static calculations, the axial force, shear force and bending moment could be got by the secondary development based on ANSYS. Finally, the anti-sliding stability, anti-overturning stability and anti-floating stability are evaluated. The results show that the seismic stability of the intake tower is in compliance with requirements, which could provide references for similar project design.

Keywords: intake tower; stability; earthquake resistance; finite element method

某水电站泄洪放空洞进水塔为岸边高耸塔式混凝土结构, 塔高 70.5 m, 一侧靠山体, 位于水下部分塔的内外均被水包围, 进水塔、地基、山体及水体之间相互作用, 机理复杂, 其稳定性直接影响电站的正常运行。为此, 本文对进水塔结构不同荷载组合的工况进行三维有限元计算分析, 模拟出进水塔在各荷载组合作用下的应力变化过程等, 在此基础上评价结构抗滑、抗倾覆、抗浮稳定性等抗震性能, 为改进设计提供依据。

1 工程概况

1.1 计算模型

进水塔的动力分析可以借用多种大型有限元分析软件, 如 ABAQUS^[1], ANSYS。本文计算采用 AN-

SYS 软件, 按进水塔混凝土结构的实际尺寸和形状建立模型, 模拟了主要的孔洞, 包括塔体流道、检修门井、通气孔等。进水塔四周山体及底下基岩部分取 2 倍进水塔高度。在剖分单元时充分考虑了塔体的复杂形状、可能产生的较大应力区域, 以及荷载的方便施加和设计所关心断面等因素, 整个塔体-地基模型采用 solid45 实体单元, 共剖分 83 430 个单元, 91 681 个节点。其中塔体单元数为 17 474, 节点数 20 405, 并且采用 12 521 个单自由度质量 Mass21 单元模拟动水附加质量。整体模型结构如图 1 所示。

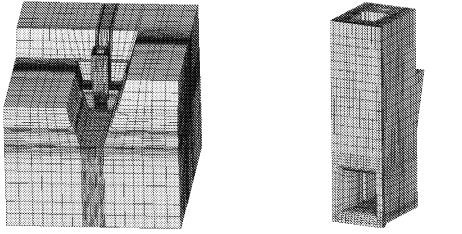
1.2 计算荷载

(1) 静力荷载

以进水塔结构为研究对象, 计算中考虑静力荷载有塔体自重、静水压力、扬压力、浪压力、风荷载等。

(2) 动力荷载

动力计算主要考虑塔体结构地震惯性力和塔体内外动水压力对进水口结构整体动力响应的作用,其中塔体内外地震动水压力以附加质量^[2]的形式考虑。



(a)进水塔整体结构网格图 (b)进水塔塔体网格图

图1 有限元网格图

工程抗震设计采用基本烈度作为设计烈度,地震设防烈度7度,地震动参数取100 a超越概率5%的基岩地震动峰值加速度0.23 g。动力计算考虑顺水流方向、横水流方向和竖向的地震作用。反应谱采用《水工建筑物抗震设计规范》^[3]的规定的标准设计反应谱。

地震作用力主要有:

(1) 地震惯性力:通过结构质量分布与地震加速度考虑;

(2) 地震主动土压力:通过结构与周围岩体的动力相互作用考虑;

(3) 进水塔内、外的动水压力:进水塔内、外动水压力可分别作为内外表面的水体附加质量来考虑,动水附加质量依据规范单塔公式进行计算:

$$m_w(h) = \psi_m(h) \rho_w \eta_w A \left(\frac{a}{2H_0} \right)^{-0.2} \quad (1)$$

式中: m_w 为水深 h 处单位高度动水压力附加质量代表值; $\psi_m(h)$ 为附加质量分布系数,对进水塔内动水压力取0.72,对进水塔外动水压力应按水工建筑物抗震设计规范^[3]的规定取值; ρ_w 为水体质量密度标准值; η_w 为形状系数,进水塔内取1.0,进水塔外接水电站进水口设计规范^[4]取值; A 为进水塔沿高度平均截面与水体交线包络面积; a 为塔体垂直地震作用方向的迎水面最大宽度沿高度的平均值; H_0 为水深。

1.3 计算工况

根据不同的荷载组合,计算采用表1所示工况。

2 计算原理

2.1 计算基本假定

(1) 混凝土和基岩为各向同性均质弹性体,无质量地基,动力分析求解结构的自振特性时,不计阻

尼的影响。

表1 进水塔动静力计算工况

作用组合	设计状况	工况
基本组合	持久状况	①静力荷载
		②静力荷载+顺水流地震荷载+竖向地震荷载
特殊组合	偶然状况	③静力荷载+横水流地震荷载+竖向地震荷载

(2) 为简化分析,假定一期与二期混凝土、回填混凝土与进水塔结构、岩体与混凝土变形协调、密合良好,不存在接触滑移;进水塔两侧及背侧岩体稳定,不计固结灌浆和锚杆的局部加强作用。

(3) 根据已有研究成果和经验,地震动输入的不均匀性影响较小而忽略不计,采用一致均匀输入,地震反应分析时,混凝土及岩体的阻尼比取5%。

(4) 在进行分析计算和安全评价时,采用材料的静力参数,不考虑动力加载对钢筋混凝土和岩体材料增强的影响。

2.2 稳定性安全评价

(1) 抗滑稳定安全评价

进水塔的整体抗滑稳定性可按式(2)抗剪强度公式核算^[4]:

$$\gamma_0 \psi \sum P_R \leq \frac{1}{\gamma_d} \left(\frac{f'_{RK}}{\gamma_{f'}} \sum W_R + \frac{c'_{RK}}{\gamma_c} A_R \right) \quad (2)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数,取1.1; ψ 为设计状况系数,对于偶然状况,取0.85; γ_d 为抗滑稳定结构系数,取1.3; f'_{RK} 为基础底面混凝土与基岩接触面的抗剪断摩擦系数,取1.25; c'_{RK} 为基础底面混凝土与基岩接触面的抗剪断粘聚力,取1.55 MPa; $\gamma_{f'}$ 、 γ_c 分别为材料性能分项系数,对于地震工况,当按动力法计算时分别取1.3、3.0; P_R 为基础计算面上全部切向作用之和(设计值); W_R 为基础计算面上全部法向作用之和,向下为正(设计值); A_R 为基础底部计算面的截面面积。

(2) 抗倾覆稳定安全评价

进水塔的整体抗倾覆稳定性可按式(3)核算^[3]:

$$\gamma_0 \psi \sum M_0 \leq \frac{1}{\gamma_d} \sum M_s \quad (3)$$

式中: γ_d 为抗滑稳定结构系数,取1.2; M_0 为基础计算面上倾覆力矩(设计值); M_s 为基础计算面上抗倾覆力矩(设计值)。

(3) 抗浮稳定安全评价

进水塔的整体抗倾覆稳定性可按下式核算^[3]:

$$\gamma_0 \psi \sum U_R \leq \frac{1}{\gamma_d} \sum W'_R \quad (4)$$

式中： γ_d 为抗浮稳定结构系数，取 1.1； U_R 为建基面上扬压力（设计值）； W'_R 为建基面上全部重力，不含设备重力（设计值）。

对于式(2) ~ 式(4)，定义稳定安全系数为 λ （公式右边值）/（公式左边值），即 $\lambda \geq 1.0$ 时满足规范要求。

2.3 进水塔结构任意截面的内力计算

由于进水塔结构复杂，并与基岩、水体、周围山体相互作用，用常规结构力学杆系结构计算截面的内力需要进行一定简化，影响计算精度。采用 ANSYS 软件的路径映射^[5]功能，通过路径积分由截面应力求得截面内力，进而评价结构不同工况下性能不失为一种好的方法。但 ANSYS 软件既有功能不能直接输出实体单元模型任意形式截面的内力图，需进行二次开发。

根据有限元理论^[6]，可以计算出每个高斯积分点处的六个应力分量 $\{\sigma_x \sigma_y \sigma_z \tau_{xy} \tau_{yz} \tau_{zx}\}$ 。根据力的平衡以及材料力学剪力互等定理，可得 3 个坐标方向的应力分量为

$$X_n = l_x \sigma_x + l_y \tau_{yx} + l_z \tau_{zx} \quad (5)$$

$$Y_n = l_x \tau_{xy} + l_y \sigma_y + l_z \tau_{zy} \quad (6)$$

$$Z_n = l_x \tau_{xz} + l_y \tau_{yz} + l_z \sigma_z \quad (7)$$

其中： l_x, l_y, l_z 为方向余弦。

每个高斯点的正应力分量为

$$\sigma_n = l_x X_n + l_y Y_n + l_z Z_n \quad (8)$$

每个高斯点的剪应力分量为

$$\tau_n = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2 + Z_n^2 - \sigma_n^2} \quad (9)$$

如此，得到每个高斯点的正应力分量和剪应力分量之后，通过高斯积分，可以得到截面上的轴力 N ，剪力 Q 和弯矩 M ，具体形式为

$$N = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sigma_{nij} \det(J) \omega_i \omega_j \quad (10)$$

$$Q = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \tau_{nij} \det(J) \omega_i \omega_j \quad (11)$$

$$M = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sigma_{nij} d_{ij} \det(J) \omega_i \omega_j \quad (12)$$

式中： $\det(J)$ 为雅可比行列式； ω_i, ω_j 为高斯积分权重系数； d_{ij} 为高斯点距截面转动轴距离。

ANSYS 软件在通用后处理器中提供了面操作功能，面上数据的运算包括基本数学计算、矢量运算和积分求和运算等，需先将结果数据映射到指定的面上，求实体单元模型内力图的基本步骤可按参考文献^[7]进行。

3 计算结果与分析

3.1 自振特性分析

计算采用 block lanczos 法进行模态分析，进水塔的前 15 阶自振频率和周期如图 2 所示。由图 2 可见，在正常蓄水位情况下，与空库相比，水体存在降低了结构自振频率。同时可以看出，从第 6 阶开始，进水塔相邻自振频率分布较为密集。

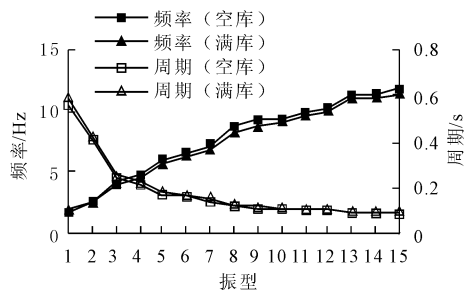


图 2 进水塔前 15 阶自振周期与自振频率

3.2 应力分析

为验算塔体抗滑稳定、抗倾覆稳定及抗浮稳定性，由式(2) ~ 式(4)可知，需要求得验算截面轴力、剪力及弯矩。图 3 为塔体工况①建基面应力等值线图。应力符号正号表示为拉应力，负号表示为压应力。由 2.3 节方法，对该面上相应应力进行积分即可求得相应内力。其它工况类推。

3.3 抗滑稳定性分析

塔体抗滑稳定性验算取塔体与基岩的接触面为验算截面。持久状况以工况 1 计算，即正常蓄水位（闸门打开）的情况；偶然状况以工况 2，即正常蓄水位（闸门打开）+ 顺河向地震 + 竖直向地震及工况 3 即正常蓄水位（闸门打开）+ 横河向地震 + 竖直向地震。计算结果如表 2 所示，可见在不超过设防地震加速度地震发生时，进水塔结构抗滑稳定安全系数均在 3.0 左右，满足规范要求，安全裕度较大。

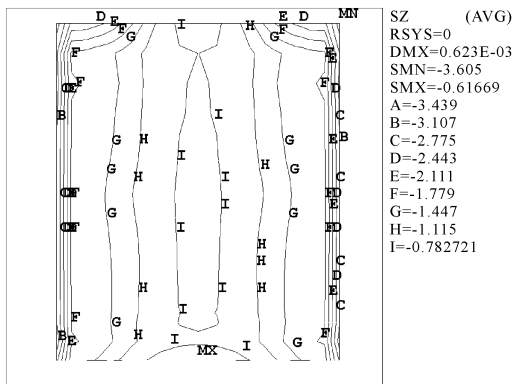
表 2 塔体抗滑稳定性计算表

计算值	持久状况	偶然状况	偶然状况
	工况 1	工况 2	工况 3
$\gamma_0 \psi \sum P_R / \text{MN}$	221.7	276.5	264.6
$\frac{1}{\gamma_d} \left(\frac{f_{rk}}{\gamma_f} \sum W_R + \frac{c_{rk}}{\gamma_c} A_R \right) / \text{MN}$	731.5	810.0	813.8
安全系数 λ	3.3	2.9	3.1

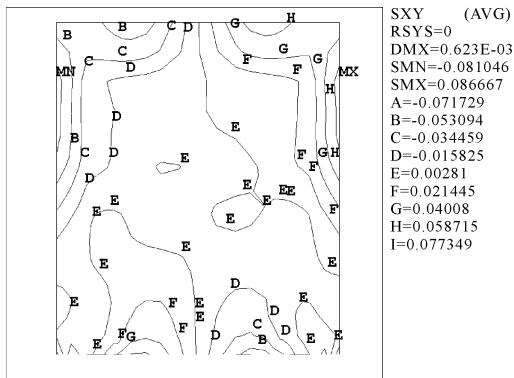
3.4 抗倾覆稳定性分析

进行抗倾覆稳定性验算时，对塔体迎水面与基岩面的相交线求矩。持久状况以工况 1 计算，即正常蓄水位（闸门打开）的情况；偶然状况以工况 2，即

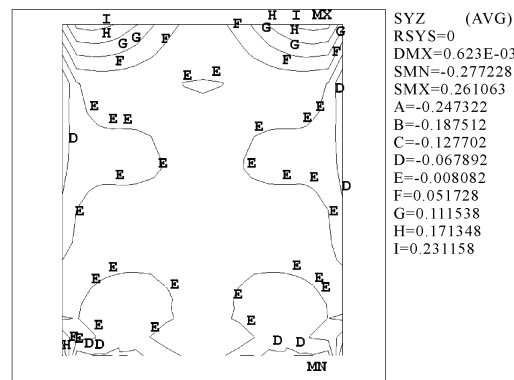
正常蓄水位(闸门打开)+顺河向地震+竖向向地震及工况 3 即正常蓄水位(闸门打开)+横河向地震+竖向向地震。计算结果如表 3 所示,持久状况、偶然状况安全系数分别达到 4.0、2.0 以上,满足规范要求,且安全裕度也较大。



(a) 建基面竖向正应力(σ_z)/MPa



(b) 建基面顺水流方向切应力(τ_{xy})/MPa



(c) 建基面顺水流方向切应力(τ_{yz})/MPa

图 3 建基面应力等值线图

3.5 抗浮稳定性分析

持久状况以工况 1 计算,即正常蓄水位(闸门打开)的情况,偶然工况不需要验算,计算结果如表 4 所示,安全系数为 2.3,满足规范要求。

表 3 塔体抗倾覆稳定计算表

计算值	持久状况	偶然状况	偶然状况
	工况 1	工况 2	工况 3
$\gamma_0 \varphi \sum M_0 / (\text{MN} \cdot \text{m})$	4009.5	7541.4	7738.2
$\frac{1}{\gamma_d} \sum M_S / (\text{MN} \cdot \text{m})$	15999.8	15999.8	15999.8
安全系数 λ	4.0	2.1	2.1

表 4 塔体抗浮稳定计算表

计算值	持久状况	偶然状况	偶然状况
	工况 1	工况 2	工况 3
$\gamma_0 \varphi \sum U_R / \text{MN}$	310.3	—	—
$\frac{1}{\gamma_d} \sum W'_R / \text{MN}$	705.5	—	—
安全系数 λ	2.3	—	—

4 结 论

采用 ANSYS 软件对某水电站进水口进水塔结构进行了静力和动力分析,并对其进行二次开发,基于路径映射功能,通过路径积分由截面应力求得截面内力,得到复杂结构任意截面的内力图,充分采用有限元计算结果对进水塔结构抗震稳定性性能进行评价。得出:① 在静力荷载作用下即持久状况 1,进水塔的抗滑、抗倾覆、抗浮稳定性的安全系数分别达到 3.3、4.0 和 2.3,满足规范要求,且有较大的安全富裕度;② 在地震工况下即偶然状况 2、3,进水塔抗滑、抗倾覆稳定性的安全系数较静力工况减小,但均大于 2.0,仍具有较大安全裕度。

参考文献:

- [1] 费 康. ABAQUS 软件在高速水塔动力分析中的应用[J]. 水利与建筑工程学报, 2008, 6(4): 10-12, 19.
- [2] 彭翠玲, 李声平, 吴杰芳, 等. 水布垭水电站进水塔结构抗震分析与安全评估[J]. 长江科学院院报, 2005, 22(2): 50-52.
- [3] 中国水利水电科学研究院. DL5073-2000. 水工建筑物抗震设计规范[S]. 北京: 中国水利水电出版社, 2001.
- [4] 中华人民共和国国家发展和改革委员会. DL/T5398-2007. 水电站进水口设计规范[S]. 北京: 中国电力出版社, 2007.
- [5] 胡晓伦, 陈艾荣. ANSYS 路径映射技术在结构分析中的应用[J]. 交通与计算机, 2004, 22(3): 86-89.
- [6] 王勖成. 有限单元法[M]. 北京: 清华大学出版社, 2003: 148-149.
- [7] 熊 刚, 杨立波. 基于 ANSYS 二次开发的实体单元模型内力图的实现[J]. 交通与计算机, 2007, 25(4): 106-108, 112.