

文章编号: 1000-7598-(2005)07-1136-05

刘家峡水电站扩机工程调压井结构研究

张伟¹, 吴海林¹, 伍鹤皋¹, 孙海涛², 费文秉²

(1. 武汉大学 水资源与水电工程科学国家重点实验室, 武汉 430072; 2. 国电公司西北勘测设计研究院, 西安 710065)

摘要: 基于三维有限元法, 对刘家峡水电站扩机工程调压井结构进行了静力、反应谱分析及非线性有限元分析, 评价了结构的荷载效应。首先根据线弹性有限元分析结果, 采用拉应力图法对调压井衬砌结构进行了配筋; 然后以考虑混凝土开裂的非线性有限元方法校核结构强度和裂缝宽度。通过调整配筋面积, 提出了适合于该水电站扩机工程调压井结构的最优结构型式和配筋方案。

关键词: 调压井; 地震响应分析; 非线性有限元; 配筋设计

中图分类号: TV 313

文献标识码: A

Structural study on surge chamber in Liuji Xia Hydropower Station

ZHANG Wei¹, WU Hai-ling¹, WU He-gao¹, SUN Hai-tao², FEI Wen-bing²

(1. State Key Laboratory of Water Resources and Hydropower Engineering Science, Wuhan 430072, China;

2. Northwest Investigation and Design Institute, State Power Corporation, Xi'an 710065, China)

Abstract: Based on three-dimensional finite element method, the static analysis, spectrum analysis and nonlinear analysis of the structure of surge chamber of Liuji Xia Hydropower Station have been carried out. Load effects are evaluated in this paper. In accordance with the results of linear FEM analysis, a design scheme of reinforcement is proposed. Then, the strength of the structure and crack width are checked by using the nonlinear FEM. After several times of adjusting steel bars area of the structure, an optimal structure and corresponding reinforcement are obtained.

Key words: surge chamber; seismic analysis; nonlinear finite element method; design of reinforcement

1 引言

刘家峡水电站扩机工程调压井采用阻抗式, 直径 26 m, 开挖直径约为 32 m, 总高度为 113.5 m, 地面以上 38.5 m。这样的高耸结构, 在各种静载和地震作用下, 结构响应比较复杂, 且在地面以上部分由于防渗要求, 必须进行钢筋混凝土非线性分析, 研究合理配筋方案, 以满足结构强度和限裂要求。针对这些问题, 本文对调压井结构进行了静力、反应谱分析以及钢筋混凝土非线性有限元分析, 全面评价了结构的荷载效应, 提出用非线性有限元法校核结构强度和指导配筋设计的方法, 并将这一方法有效地应用到刘家峡水电站扩机工程调压井结构分析中, 为相关工程提供参考。

分析采用大型通用有限元软件 ANSYS, 该软件有强大的前后处理模块和非线性方程求解器模块, 能进行结构、热、流体、电磁、声学等领域分

析, 并可进行相关领域的耦合分析, 在我国的科研设计单位广泛应用。

2 计算模型和方法

调压井主体结构由井筒、闸门井、底板、阻抗孔以及下部隧洞组成, 隧洞在调压井后分岔, 为两台机组供水。隧洞底部标高 1 640 m, 地面标高 1 715 m, 井顶标高 1 753.5 m, 筒壁主体壁厚 3~4 m, 地面 1 730 m 以上由 4 m 渐变至 1 m。建立包含调压井、前部隧洞、后部分岔管及周围岩体的有限元模型, 用三维实体单元较精细地模拟了各部分结构, 有限元模型见图 1。

静力分析采用三维线弹性有限元法, 分析结构在运行工况和检修工况下的荷载响应, 为下一步进行结构非线性分析及配筋提供基础。

地震作用可基于弹性原理, 采用振型分解反应

谱法，也可采用基于文献[1]提示的考虑材料非线性和接触非线性的时程分析法，本文采用前者，反应谱参照规范^[2]相关规定考虑。设计烈度取Ⅶ度，阻尼比取 0.05，场地类别按Ⅱ类土考虑，水平向设计地震加速度代表值 α_h 取值为 0.15 g (g 为重力加速度)，设计反应谱最大值的代表值取为 2.25，特征周期取值为 0.45 s，计算采用的反应谱如图 2 所示。

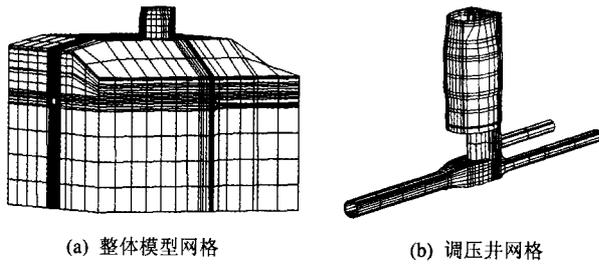


图 1 有限元模型
Fig.1 Finite element model

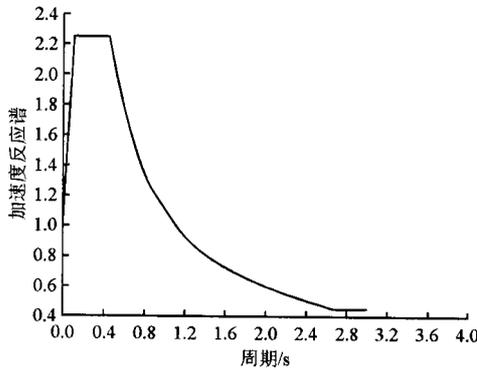


图 2 反应谱
Fig.2 Response spectrum

水体动力作用按附加水体质量考虑，以质点单元模拟，单元质量参照规范^[3] 进水塔结构的动水压附加质量公式得出，计算公式如下：

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

式中 $m_w(h)$ 为水深 h 处单位高度动水压力附加质量代表值； $\varphi_m(h)$ 为附加质量分布系数； ρ_w 为水体质量密度的标准值； η_w 为形状系数； A 为塔体沿高度平均截面与水体交线包络面积； α 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。

非线性分析中，钢筋采用分布钢筋模型，裂缝采用分布裂缝模式。基于 E. Hognestad 建议的混凝土本构模型^[4]，建立多线性弹性本构关系如图 3 所示。混凝土破坏准则在三向受拉时为最大主应力准则，三向受压时为 William-Warnke 五参数准则，其它应力状态以 William-Warnke 五参数为基础的过渡形式，保证了破坏面的连续性。混凝土在拉伸破坏前，应力-应变是线性关系；裂缝出现后，破坏平面

的法向刚度、剪切刚度降低，应力-应变关系沿着破坏面和垂直于破坏面的方向建立。混凝土开裂后裂缝面的剪力传递能力不同，闭合裂缝残留抗剪系数取值大于张开裂缝的取值。材料在压坏后各方向刚度降低到接近于零（考虑到收敛问题，未降为零），单元刚度矩阵对总体刚度矩阵的影响可忽略。

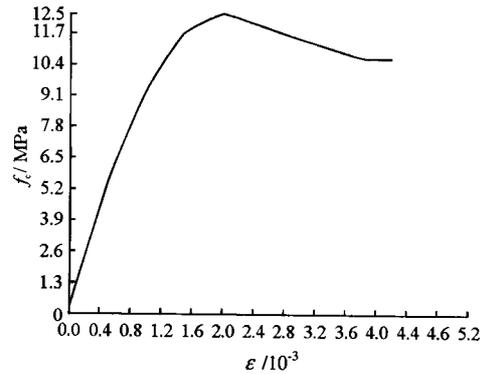


图 3 混凝土多线性本构关系
Fig.3 Multi-linear elastic constitutive relationship of concrete

计算采用的材料力学参数见表 1。

表 1 材料力学参数
Table 1 Mechanical parameters of materials

材料名称	重度 / $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$	弹性模量 / GPa	泊松比	抗压强度 /MPa	抗拉强度 /MPa
混凝土	24.5	28	0.167	12.5	1.3
钢筋	78.5	206	0.3	335	335
基岩	—	5	0.22	—	—

注：钢筋强度为屈服强度。

3 静动力分析

本文主要研究了运行期结构承受静载和动载的性能。施工期围岩的稳定性分析，考虑文献[6]所提示的一些问题，用有限元单元生死技术进行了研究，仿真分析了施工期的整个开挖及支护过程，研究表明，施工期围岩稳定能够得到保证。

3.1 静力分析

在运行工况下，井内最高涌浪(1 751.964 m)水压+结构自重+风压为最不利组合。分析表明，此运行工况下，调压井结构整体竖向向下位移，且地面部分由于结构质心偏向下游，水平位移指向下游，位移最大值发生在结构顶部下游侧中部。调压井结构主拉应力值较大，在地面以上大部分区域及地面以下部分区域超过 1 MPa，局部超过 2 MPa。地面以上的高应力区主要出现在 1 730 m 标高附近，以及闸门槽支撑梁端等应力集中区域。地下结构由于岩体的约束作用，应力分布相对均匀。在运行工况

下, 调压井外壁面的主拉应力和主压应力分布如图4所示。

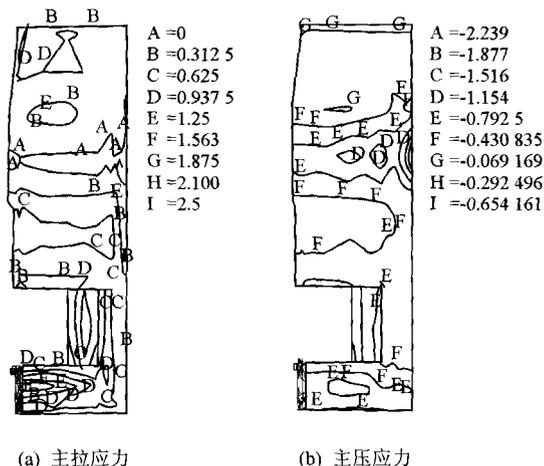


图4 运行工况下调压井外壁面主应力分布(单位: MPa)
Fig.4 Principal stress contours of exterior surface of surge chamber under running loadcase (unit: MPa)

本工程调压井为筒状混凝土结构, 筒壁较厚, 有很强的抗水平荷载的能力, 对抵抗风压十分有利, 在单独风压作用下, 最大主应力值在 0.1 MPa 以内, 说明风载对这种结构应力影响很小。

3.2 动力分析

采用振型分解反应谱法对调压井结构地震响应进行分析, 先对结构自身进行模态分析, 得到结构的动力特性——各阶振型和自振频率, 在此基础上对结构施加地震反应谱, 通过设计反应谱获得结构各振型的地震响应, 然后按振型组合的完全二次型方根法 (SRSS 法) 获得结构的总地震响应。本工程考虑水平双向设计反应谱, 即沿水流向和垂直水流向分别对结构施加反应谱, 计算时考虑了井内附加水体质量的影响。

模态分析中, 结构的自振频率和振型计算采用子空间迭代技术, 其内部使用广义 Jacobi 迭代算法, 采用完整的 $[K]$ 和 $[M]$ 矩阵, 有较高的计算精度。分析表明, 调压井结构地下部分受岩体约束, 振型没有明显变化, 振型变化主要发生在地面以上的水平方向, 且距地面高度越大变化越明显。前 30 阶振型集中在 3~22 Hz 之间, 表 2 列出了结构的前 15 阶模态。

表2 结构自振频率

Table 2 Natural vibration frequency of structure

阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz	阶数	频率/Hz
1	3.0706	6	9.9200	11	12.738
2	5.5110	7	10.555	12	13.261
3	5.9316	8	11.381	13	13.817
4	7.4192	9	12.171	14	14.481
5	7.7621	10	12.620	15	14.664

由于地震烈度为Ⅶ度, 加速度谱峰值不大, 且因大部分是地下结构, 围岩承载性能较好, 水平双向的地震作用效应较小, 大部分区域应力值在 0.5 MPa 以内, 应力值相对较大处分布在调压井上部的闸门井支撑梁上, 其中顶部两根横梁局部达到 1.0 MPa。从水平位移值来看, 谱分析结果相对静力分析大, 沿水流向谱分析的位移值可达 3.32 mm, 约为静力分析的 3 倍。

考虑自重+设计静水位荷载(水位为 1735.0 m)+水平地震荷载组合下的荷载效应分析, 作用效应组合为: 水平地震作用效应按两个方向作用效应平方和的方根计, 再与设计静水压作用效应组合。总体而言, 谱分析的应力水平较低, 竖向位移较小, 水平位移较大。就应力和竖向位移来看, 结构自重和设计静水压起主要作用; 而就水平位移来看, 地震荷载的作用占主导影响。在组合工况下, 调压井外壁面的主拉应力和主压应力分布如图 5 所示。

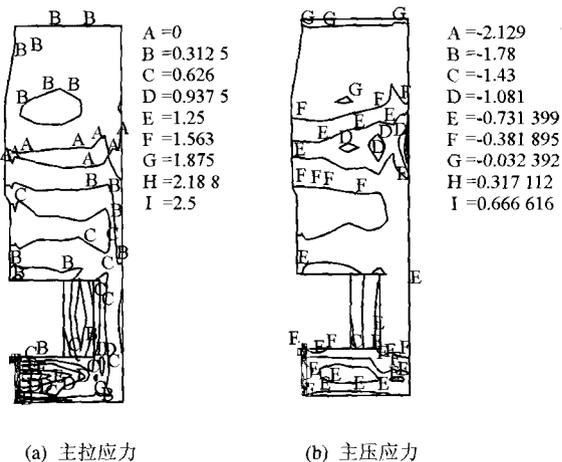


图5 组合工况下调压井外壁面主应力分布(单位: MPa)
Fig.5 Principal stress contours of exterior surface of surge chamber under combination loadcase(unit: MPa)

4 钢筋混凝土非线性分析

钢筋混凝土非线性分析思路: 根据线弹性计算的混凝土应力结果, 用规范^[2]的拉应力图法和允许裂缝宽度两种方法, 分别计算结构各部位的配筋面积; 按混凝土应力状态以及应力水平高的部位处于地上还是地下两个方面确定结构初始配筋方案; 将初始方案中各部位的钢筋面积以配筋率形式计入钢筋混凝土单元中, 进行钢筋混凝土非线性分析, 得到混凝土开裂区分布及钢筋应力; 根据分析得到的钢筋应力计算裂缝宽度, 在宽度超限处局部调整配筋率, 再次进行非线性分析, 直至各部位裂缝宽度满足要求。

拉应力图形法配筋按式(2) 计算, 对于矩形截面受拉、偏心受压构件, 荷载效应最大裂缝宽度按式(3)计算。

$$T \leq \frac{1}{\gamma_d} (0.6T_c + f_y A_1) \quad (2)$$

$$W_{max} = \alpha_1 \alpha_2 \alpha_3 \frac{\sigma_s}{E_s} \left(3c + 0.10 \frac{d}{\rho_{te}} \right) \quad (3)$$

式中 T 为由荷载设计值确定的弹性总拉力; T_c 为混凝土承担的拉力; f_y 为钢筋抗拉强度设计值; A_1 为受拉钢筋面积; γ 为钢筋混凝土结构的结构系数; α_1 为受力特征系数; α_2 为钢筋表面形状系数; α_3 为荷载长期作用的影响系数; σ_s 为受拉钢筋等效应力; E_s 为钢筋弹性模量; c 为受拉钢筋保护层厚度; d 为受拉钢筋直径; ρ_{te} 受拉钢筋有效配筋率。

确定初始配筋方案时, 对于地下结构部分, 如果围岩材料较好, 混凝土开裂后, 因有岩体的约束作用, 裂缝的进一步发展受限, 可以采用强度配筋; 而对于地面以上结构应力较大区域, 由于无其他约束, 裂缝一旦产生将会进一步发展, 应当考虑采用限裂配筋。

为设计安全经济的配筋方案, 本工程对结构分层分区配筋: 沿调压井内壁高程分层, 每一层断面又分为 4 个配筋区 (I ~ IV)。断面配筋分层及分区如图 6 (a)、图 (b) 所示, 图 6 (c) 为验算缝宽的 4 个控制断面示意图。弹性分析结果表明: 在地面以上结构中, 标高为 1 730 m 附近为混凝土应力较大区域, 初始配筋方案中在此部位按限裂配筋, 其他部位按拉应力图形配筋。

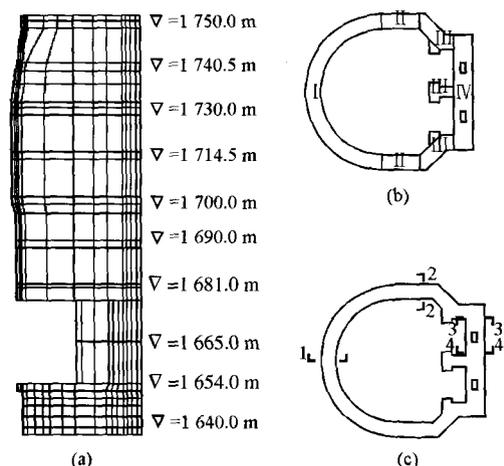


图 6 结构配筋分层分区和缝宽验算断面示意图
Fig.6 Layout of reinforcing bars in structure and sections for crack width calculation

按初始配筋方案进行非线性分析后, 在地面以上部分, 经过验算 II 区的筒外壁及 III 区与 IV 区相

接的转角处内壁存在缝宽超限区, 故在这些部位采用限裂配筋, 再次非线性分析。经验算各层控制断面缝宽达到限裂要求, 具体数值详见表 3, 满足限裂要求的几个典型高程部位结构配筋率列于表 4。调压井内壁和外壁面的钢筋应力分布如图 7 所示。

表 3 调压井内壁裂缝宽度(单位: mm)

Table 3 Crack widths of surge chamber sidewall (unit: mm)

高程 /m	1-1		2-2		3-3		4-4	
	外壁	内壁	外壁	内壁	外壁	外壁	外壁	内壁
1 750.0	0.09	0.15	0.21	0.12	0	0.24	0.24	0.08
1 728.5	0.16	0.24	0.21	0.04	0.05	0.25	0.12	0.07
1 714.5	0.06	0.07	0.04	0.02	0.02	0.21	0.04	0.01
1 700.0	0.05	0.05	0.01	0.01	0.04	0.24	0.01	0
1 681.0	0.03	0.04	0.01	0.01	0.02	0.21	0.01	0

表 4 调压井各高程断面环向配筋率

Table 4 Ratios of circumferential reinforcement bars in structure along various elevations

高程/m	层面	区号			
		I	II	III	IV
1 750.0	外层	0.003 0	0.003 0	0.003 0	0.003 5
	中层	0.003 0	0.003 0	0.003 0	0.003 0
	内层	0.003 0	0.003 0	0.003 0	0.004 8
1 740.5	外层	0.003 7	0.009 8	0.003 0	0.003 5
	中层	0.003 7	0.004 9	0.003 0	0.003 0
	内层	0.003 7	0.004 9	0.003 0	0.004 8
1 730.0	外层	0.009	0.019 6	0.004 3	0.004 3
	中层	0.009	0.006 0	0.004 3	0.004 3
	内层	0.009	0.012 0	0.004 3	0.012
1 725.0	外层	0.009	0.019 6	0.004 3	0.004 3
	中层	0.009	0.006 0	0.004 3	0.004 3
	内层	0.009	0.011 0	0.004 3	0.012
1 714.5	外层	0.003 1	0.005 3	0.003 0	0.003 0
	中层	0.003 1	0.005 3	0.003 0	0.003 0
	内层	0.003 1	0.005 3	0.003 0	0.011 0

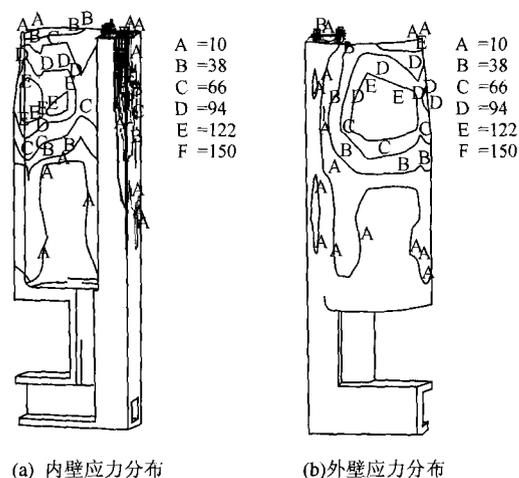


图 7 调压井钢筋应力 (单位: MPa)

Fig.7 Stresses of reinforcement bars of surge chamber(Unit: MPa)

5 结 语

对刘家峡水电站扩机工程调压井结构进行静动力分析表明：风压荷载对高度不大的厚壁筒体结构的应力影响很小；地面以上结构的高应力区主要出现在结构中上部（1 730 m 标高附近）以及闸门槽支撑梁端等应力集中区域，由于岩体的约束作用，地下结构应力分布相对均匀。在地震工况中，结构自重和设计静水压力对应力和竖向位移起主要作用，而就两向水平位移来看，地震荷载的作用占主导地位。

本文采用的基于线弹性有限元分析，用拉应力图法和允许裂缝宽度法配筋，以非线性有限元分析校核结构强度和裂缝宽度，并调整配筋面积的方法，可直接用于大体积混凝土配筋设计。这一方法在刘家峡水电站扩机工程调压井结构分析中的成功应用，使采用钢筋混凝土非线性有限元法进行配筋有了切实可行的依据，可以为其他类似工程参考。

分析采用分布式钢筋模型和分布式裂缝模型，认为开裂前混凝土与钢筋完全粘结，开裂后通过设置受拉强化（Tension Stiffening）参数，使开裂混凝土沿主拉应力方向逐渐丧失承载能力，部分考虑了粘结效应。然而，大量的研究表明，由于交界面对力的转移、混凝土中应力状况、裂缝的形成和稳定、钢筋的应力等一系列重要性质，都受到钢筋与混凝土界面性质的影响。有限元法模拟粘结滑移作用的方法是在交界面上设置粘结单元，但结合面上粘

结力的实际分布是十分复杂的，难以定量准确描述，且对于复杂的大体积混凝土结构，在所有交界面上设置粘结单元也是不现实的。因此，如何在大体积混凝土结构中有效地模拟钢筋和混凝土的粘结作用是一个需要深入研究的问题。

参 考 文 献

- [1] 刘国明, 夏颂佑, 林义兴. 三峡链子崖危岩体非线性动力响应分析[J]. 岩土力学, 1996, 17(2):7-15.
LIU Guo-ming, XIA Song-you, LIN Yi-xing. Nonlinear seismic response analysis of Lianziya rock slope in Three Gorges[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1996, 17(2):7-15.
- [2] DL/T 5057-1997, 水工建筑物荷载设计规范[S].
- [3] DL 5073-1997, 水工建筑物抗震设计规范[S].
- [4] Hognestad E, Hanson N W, Mc Henry D. Concrete stress distribution in ultimate strength design[J]. **American Concrete Institute Journal**, 1995, 52 (4): 455-479.
- [5] 董哲仁. 钢筋混凝土非线性有限元法原理与应用[M]. 北京: 中国铁道出版社, 1993.
- [6] 郑宏, 葛修润, 谷先荣, 等. 关于岩土工程有限元分析中的若干问题[J]. 岩土力学, 1995, 16(3):7-12.
ZHENG Hong, GE Xiu-run, GU Xian-rong, et al. Some problems in FEM for geotechnical engineering[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 1995, 16(3):7-12.
- [7] DL/T 505-1996, 水工混凝土结构设计规范[S].