

# 小浪底水利枢纽 3 号进水塔架 的静动力分析

胡良明 董跃星 周鸿钧  
(郑州工业大学水利与环境工程学院)

**摘 要** 利用 8~21 结点块体单元离散了 3 号进水塔,对 5 种工况进行了静动力分析,通过了 11 个断面的内力值和闸室侧墙的应力状态计算,得出一些可作为设计依据的有益结论。

**关键词** 有限元;静动力分析;进水塔

**中图分类号** TV 13

## 0 概述

小浪底水利枢纽是黄河下游以防洪、减淤为主要任务兼顾供水、灌溉、发电等效益的一项重大工程。进水塔群为组合式多功能型的一级建筑物,9 座进水塔一字排列。3 号明流洞进水塔架位于左侧,其左边为 2 号灌溉洞塔架,右边是 3 号发电洞塔架。塔体四周有回填石渣和淤积泥砂等荷载,以及每塔之间的相互作用等复杂的边界条件。进水塔按 8 级地震进行动力分析,分别考虑其顺河向水平地震和横河向水平地震两种情况。鉴于工程的重要性和问题的复杂性,其安全度对整个引水、泄水系统甚至大坝的安全起着举足轻重的作用。因此对进水塔(尤其是大型进水塔)的静动力分析是非常必要的。

## 1 计算模型及有限元离散化

### 1.1 模型简况

3 号进水塔塔顶高程 283.0 m,塔体宽 16.0 m,塔长在高程 250.0 m 以上为 35.0 m,在绕道部分为 53.0 m。进水口底部高程为 225.0 m,基础大体积混凝土底部高程为 200.0 m,200.0 m 以下为基岩,作均质处理。

塔基在 225 m~185.0 m 之间,顺河向在塔前部进水前及塔后部流道出口后各取 50 m,垂直流向在塔左侧以及塔右侧以右各取 50.0 m 和塔体一起进行整体三维有限元计算,参见图 1。

### 1.2 单元部分

计算时座标原点设在进水口平面、塔体左右对称线上,高程为 0.0 m 处,X 轴正向指向下游,Y 轴正向指左岸,Z 轴铅直向上。整个结构和地基共剖分了 633 个单元,1798 个结点,4857 个自由度。其单元和结点的分布情况见表 1。

由表 1 可以看出,流道部分集中了较多的单元和结点,这主要是考虑到流道部分受力较大,体型及应力状态较复杂。同时流道部分也是设计单位比较关心的区域。其单元剖分立

收稿日期:1998-04-14

第一作者 男 1963 年 12 月生 硕士学位 讲师

体图见图 1。

表 1 3 号进水塔单元及结点分布

	上部结构 E283~E250	流 道 E250~E225	地 基 E225~E180	总 计
单元数	132	295	206	633
占总数	20.9%	46.6%	32.5%	100%
结点数	500	893	405	1798
占总数	27.8%	49.7%	22.5%	100%

2 计算荷载及计算方案

3 号进水塔的计算荷载主要包括：

(1) 自重：塔体及设备重量。

(2) 水压力：水位为 275 m 时，容重取  $10.55 \text{ kN/m}^3$ 。

(3) 泥沙压力：淤沙高程为 250 m，泥沙饱和容重为  $18 \text{ kN/m}^3$ ，湿容重为  $16 \text{ kN/m}^3$ ，内摩擦角  $\varphi=10^\circ$ ，凝集力  $C=0$ ，在地震情况下位于水下的淤沙内摩擦角  $\varphi=0^\circ$ ， $C=0$ ，液化泥压力计算容重为  $1.8 \text{ kN/m}^3$ ，塔前无淤沙。

(4) 地震动荷载：进水塔按  $0.215 \text{ g}$  地面加速度，相当于 8 级强度的地震设防。地震设计反应谱见表 2，对于塔体内外水体的动力影响以及塔上设备的动力影响均按附加质量方法施加。

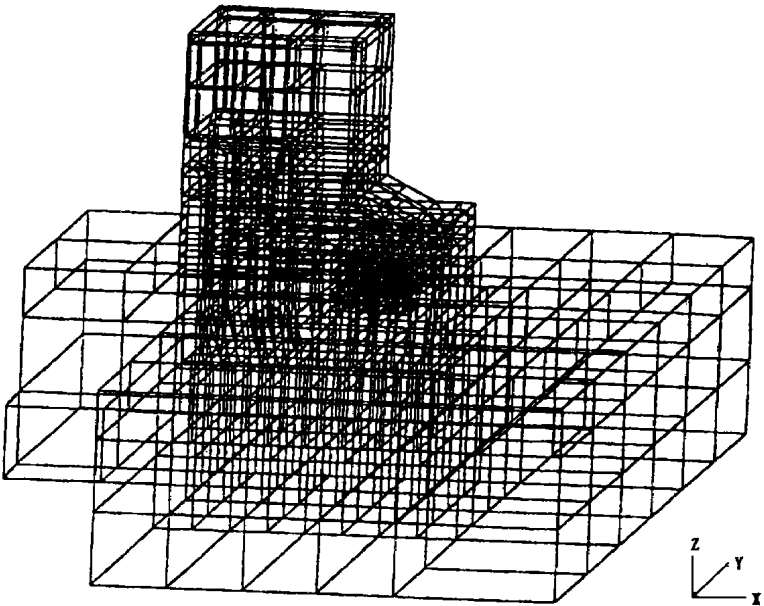


图 1 单元剖分立体图

表 2 场地设计反应谱(远场)

周 期(s)	0.03	0.07	0.1	0.3	0.6	10
动力系数 $\beta$	1.0	1.9	2.5	2.5	2.5	0.2

根据设计单位的要求，3 号塔总共计算了下列 5 种情况：

工况Ⅰ：275.0 m 水位，工作门挡水，静力计算。

工况Ⅱ：275.0 m 水位，事故门挡水，静力计算。

工况Ⅲ：275.0 m 水位，事故门挡水，静荷载加顺河向地震作用，其中静、动力按不利原

则组合。

工况Ⅳ:275.0 m 水位事故门挡水,静荷载加垂直河流向地震作用,其中静、动力按不利原则组合。

工况Ⅴ:考虑塔体及基岩的自重和 275.0 m 水位工作门挡水时作用在大梁上的弧门推力,作静力计算。

3 材料特性

3 号进水塔塔体和基础系统共有 3 种材料,它们分别是:塔体及底板采用 250#混凝土,静弹模为  $2.85\times10^4$  MPa,塔基大体积混凝土为 150#,静弹模为  $2.3\times10^4$  MPa,回填混凝土为 100#,静弹模为  $1.85\times10^4$  MPa,它们的容重为  $24\text{ kN/m}^3$ ,泊松比为 0.167,基岩容重为  $2.62\text{ kN/m}^3$ ,变形模量为  $8\times10^4$  MPa,泊松比为 0.25,动力分析时,动弹模取值为静弹模的 1.3 倍。

4 计算成果及其分析

4.1 内力计算成果

对于工况Ⅰ至工况Ⅳ,我们计算了 11 个断面的内力最大值和最小值,限于篇幅,本文只给出工况Ⅳ的内力最大值及最小值,见表 3。

表 3 计算断面内力最大值及最小值表(工况Ⅳ)

断面号	轴力( $10^4\text{N}$ )				剪力( $10^4\text{N}$ )				弯矩( $10^4\text{N}\cdot\text{m}$ )			
	$N_{\max}$	点号	$N_{\min}$	点号	$Q_{\max}$	点号	$Q_{\min}$	点号	$M_{\max}$	点号	$M_{\min}$	点号
1	-4.02	139	-34.56	175	21.14	179	-20.38	183	12.43	178	-12.75	175
2	-17.78	268	-147.44	254	50.30	263	-49.39	267	32.25	268	-31.89	272
3	-103.80	447	-341.2	462	157.80	491	-149.74	495	68.85	490	-137.92	466
4	-47.83	1325	-275.62	1368	67.51	1346	-63.24	1393	38.88	1389	-29.80	1326
5	6.67	17	-179.0	223	11.28	237	-20.63	251	4.96	17	-17.73	223
6	-376.61	391	-1038.4	1166	127.36	804	-142.82	810	117.74	1166	-109.34	1161
7	-8.20	26	-1018.3	1184	140.30	910	-155.28	916	144.27	1184	-130.26	1179
8	7.50	42	-1178.4	1194	337.68	1358	-369.58	1354	462.13	1194	-414.93	1027
9	-370.2	758	-123.50	1270	447.60	1368	-459.20	1364	928.27	944	-1014.0	939
10	-217.2	770	-1279.4	1284	431.68	1284	-460.20	1281	1007.50	1066	-1043.7	957
11	-156.6	893	-1264.8	1298	330.30	1383	-351.10	1243	925.50	1084	-940.8	1079

由表 3 可以看出:

(1)在所有工况中,事故门挡水加侧向地震时,计算断面的内力值最大。此时最大轴向压力为  $-1.279\times10^7\text{ N}$ ,其点坐标为(40.4, -8, 227.7),最大剪力值为  $-4.60\times10^6\text{ N}$ ,其点坐标为(40.4, 8, 227.7)最大弯矩为  $-1.044\times10^7\text{ N}\cdot\text{M}$ ,其点坐标为(40.4, 8, 235.7)。

(2)上部结构(▽250 m 以上)内力值均较小,内力最大值均发生在流道部分。

4.2 应力分析成果

工作门闸室侧墙是主应力较大的区域,也是设计单位所关心的区域,为此,我们重点计算了工作门闸室侧墙的主应力分布情况,其主要结果如下:

(1)在静力荷载作用下,工作门挡水时(工况Ⅰ)侧墙表面最大主压应力发生在左侧墙外侧,其值为  $-4.26\text{ MPa}$ ,最大主拉应力发生在左侧墙内侧,其值为  $2.52\text{ MPa}$ ;事故门挡水时

(工况Ⅱ),最大主压应力发生在左侧墙外侧,其值为 $-4.16\text{ MPa}$ ,最大主拉应力发生在左侧墙内侧,其值为 $2.11\text{ MPa}$ 。

(2)工作门挡水时侧墙的最大主拉应力大于事故门挡水时的最大值,原因在于工作门挡水时,弧门推力通过大梁在侧墙上产生了一定的拉应力。

(3)在既有弧门推力又有外水压力情况下,工作门闸室侧墙的最大主拉应力为 $2.50\text{ MPa}$ ;在仅有外水压力没有弧门推力情况下,工作门闸室侧墙的最大主拉应力值仅为 $2.07\text{ MPa}$ ;而仅有弧门推力没有外水压力时工作门闸室侧墙的最大主拉应力值仅为 $0.64\text{ MPa}$ 。由此可见:工作门闸室侧墙的最大主拉应力值主要由外水压力引起。

4.3 动力分析成果

4.3.1 自振特性

塔体的前 6 阶自振频率及周期列于表 4,限于篇幅,其振型图不再给出。

表 4 3 号进水塔自振特性表

阶 次	1	2	3	4	5	6
频率 $f$	2.519	4.669	5.619	7.846	10.770	11.853
周期 $T$	0.397	0.214	0.178	0.128	0.093	0.084

4.3.2 地震对塔体计算断面最大内力值的影响

由工况Ⅱ,Ⅲ,Ⅳ的内力计算成果可以分析地震对塔体计算断面内力的影响,见表 5。

表 5 塔体计算断面最大内力值对照表

内 力	静 荷	静荷+顺震	提高率(%)	静荷+侧震	提高率(%)
最大轴力( $10^4\text{ N}$ )	5.50	5.52	0.4	6.67	21.3
	-645.90	-651.94	0.9	-1279.40	98.1
最大剪力( $10^4\text{ N}$ )	353.50	354.72	0.3	447.60	26.6
	-368.00	-369.20	0.3	-460.20	25.1
最大弯矩( $10^4\text{ N}\cdot\text{m}$ )	769.47	772.67	0.4	1007.50	30.9
	-799.47	-802.67	0.4	-1043.70	30.5

由上表可以看出:

(1)顺河向地震对塔体计算断的内力影响不大,内力最大值的提高率不超过 1%。

(2)侧向地震对塔体内力有较大影响,对轴力的影响更为明显。塔体计算断面在侧向地震作用下的最大轴力由静力时的 $-6.46\times 10^6\text{ N}$ 提高到 $-1.28\times 10^7\text{ N}$ ,提高率为 98.1%,最大剪力的提高率为 26.6%,最大弯矩的提高率为 30.9%。

(3)侧向地震作用下的最大内力值为所有工况下出现的最大值,此时的最大轴压力为 $-1.28\times 10^7\text{ N}$ ,最大剪力为 $-4.60\times 10^5\text{ N}$ ,最大弯矩值为 $-1.04\times 10^7\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

5 主要结论

综上所述,通过对 3 号塔的静动力计算分析,可得主要结论如下:

(1)在所有计算工况中,事故门挡水加侧向地震这一工况下结构的内力及应力值最大。

(2)工作门闸室侧墙的最大主拉应力值为 $2.91\text{ MPa}$  位于左侧墙内侧,高程 235.7 m,桩号 0+038.4 处;最大主压应力值为 $-6.42\text{ MPa}$ ,位于右侧墙外侧,离程 229.7 m,桩号 0+050.0 处。

(3)塔体计算截面上出现的最大轴向拉力值为  $6.67\times10^4\text{ N}$ , 位于塔左右对称线上, 高程283.0 m, 桩号 0+09.2 处;最大轴向压力值为  $-1.28\times10^7\text{ N}$ , 位于工作门闸室左侧墙, 高程227.7 m, 桩号 0+040.4 处;剪力最大值为  $-4.60\times10^5\text{ N}$ , 发生在工作门闸室右侧墙, 高程227.7 m, 桩号 0+040.4 处;弯矩最大值为  $-1.04\times10^7\text{ N}\cdot\text{M}$ , 位于工作门闸室右侧墙, 离程为 235.7 m, 桩号为 0+040.8 处。

(4)工作门闸室侧墙内侧出现的最大主拉应力主要由外水压力引起。

(5)工作门推力在工作门闸室侧墙上产生的主拉应力主要集中在大梁支座附近, 对较远处的影响可以忽略不计。

参考文献

1 周鸿钧, 胡良明. 小浪底 2 号明流洞进水塔修改方案的静动力分析, 郑州工学院学报, 1994, 15(4): 13~19  
2 张五岳. 大型进水塔的应力分析:[学位论文]. 郑州: 郑州工业大学, 1990  
3 周鸿钧, 王宗敏, 李世同. 高进水塔弧门闸室段应力分析及改善应力状态的工程措施. 见: 工程力学编辑部编. 第四届全国结构工程学术会议论文集(下). 北京: 清华大学出版社, 1995. 1948~1954

Static and Dynamic Analysis of the Tower of  
No. 3 in Xiaolangdi Project

Hu Liangming Dong Yuexing Zhou Hongjun  
(Zhengzhou University of Technology)

**Abstract** In this paper, 8~21 node solid elements are used to divide the Xiaolangdi No. 3 intake tower, in consideration of 5 different schemes, the static and dynamic analysis is presented. The interforces of 11 sections and the stress state of the sluice chamber side wall are calculated. Some useful conclusions are given, which may be used as the basis of designing.

**Keywords** finite element method; static and dynamic analysis; intake tower