

# 小浪底2号明流洞进水塔 修改方案的静动力分析\*

周鸿钧 胡良明

(应力分析及抗震研究室)

**摘 要:** 本文采用8—21节点块体单元离散了小浪底2号明流洞进水塔,对六种不同工况进行了静动力分析,了解了流道部分的应力状态,并对其安全度作出评价,得出了一些可作为设计依据的有益结论。

**关键词:** 进水塔、有限元、静动力分析

**中图分类号:** TV732

进水塔位于水库隧洞的首部,是引水、泄水系统的控制性水工建筑物。它的安全性对整个引水、泄水系统甚至大坝的安全起着举足轻重的作用。因此进水塔(尤其是大型进水塔)的静动力分析是非常必要的。

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。2号明流塔位于塔群的中间部位,其左侧与3号孔板洞塔相邻,右侧与2号排沙发电洞塔相接。塔体四周有回填石渣、淤积泥沙等荷载,以及每塔之间的相互作用等复杂的边界条件。鉴于工程的重要性的问题的复杂性,其安全度在工作过程中是极为重要的。根据2号明流洞进水塔原设计方案进行的三维有限元计算成果可以看出,由于地震及侧向水压力的作用,在塔体流道部分侧墙出现较大的拉应力,最大值为4.33MPa,而且为双向受拉区,范围较大,一般拉应力值均在3.7Mpa左右<sup>[1]</sup>,远远超出了混凝土材料的极限抗拉强度,将使结构物遭致破坏。为了保证2号明流塔在静、动荷载作用下能正常工作,设计单位曾采用预应力锚束方案<sup>[1]</sup>,并对预应力锚束布置进行了多种方案比较,结果最优的布置方案也仅能降低拉应力9%左右,满足不了要求,因而放弃了采用预应力锚束方案。鉴于此种情况,黄委会勘察设计院经比较后,对2号明流塔采取了加厚流道边墙的方案,即在原方案的基础上,将进水塔流道部分的边墙由4米加厚到5.5米,其范围从桩号0+23一直到尾部,高程从230米到205米。对修改后的2号明流塔进行三维有限元静动力计算,了解流道部分的应力状态,判定其是否满足强度要求,并对其安全度作出评价。

\* 收稿日期: 1993-12-22

## 1 计算模型及有限元离散化

### 1.1 计算模型

2号塔塔顶高283米,塔体最大宽度为19米,进水口底部高209米,岩面高175米,总高度108米,最大长度52.8米,塔体结构关于顺河向对称,而所受横河向地震荷载关于顺河向反对称。为节省工作量,取一半塔体在对称面上分别施加正反对称条件进行计算。

### 1.2 有限元离散化

计算时采用的坐标系为右手系,坐标原点设在左侧墙左端外侧桩号为0+00m的海平面上,X轴横河流向指向右岸,Y轴顺河流向指向下游,Z轴铅直向上。正对称模型从高程283.0米到99.0m共267个8—21节点三维等参元和88个8节点非协调单元,共1394个节点,3613个自由度。反对称模型从高程283.0米到205.0m共246个8—21节点三维等参元,位于283.0米到205.0m之间,共计2940个自由度。修改方案后的单元剖分立体图见图1。

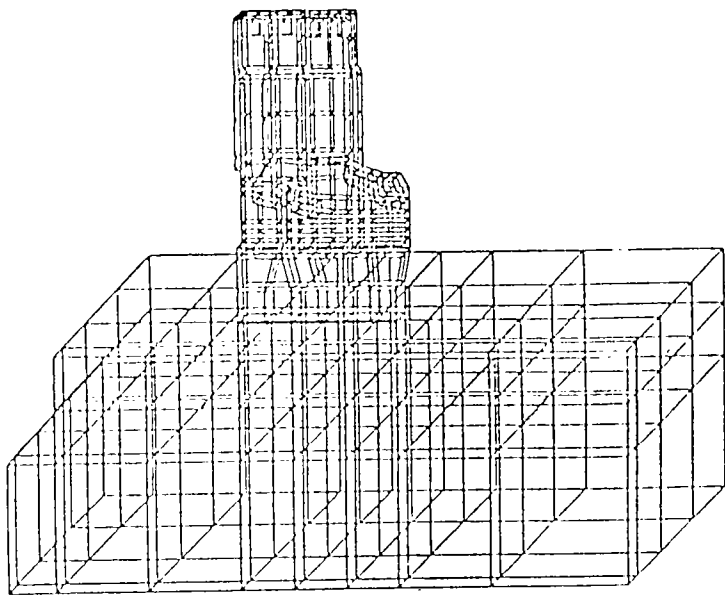


图 1

## 2 计算荷载与计算方案

2号明流进水塔的计算荷载包括:

①自重:塔体及设备重量。

②水压力:汛期275米水位时,取浑水容重 $1.055\text{t}/\text{m}^3$ ,在250米到230米之间,由于泥沙压力的影响,其饱和容重为 $1.8\text{t}/\text{m}^3$ ,内摩擦角 $\varphi_0=10^\circ$ 。

③其它荷载有泥沙压力、回填石渣压力, 浪压力、扬压力、工作门上水压力以及相邻塔基础面上的边载等。

④地震动荷载: 进水塔按 0.215g 地面加速度, 相当于 8 度强的地震设防。地震设计反应谱见表 1, 取综合影响系数  $C_z=0.25$ , 按振型组合的 CQC 汉法 (完全二次项组合法), 计算进水塔的动力分析。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。

表 1 远场场地设计反应谱

周期(秒)	0.03	0.07	0.1	0.3	0.6	1.0
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, 2 号塔总共计算了下列六种情况:

工况 I:  $\nabla 275.0$  米水位, 工作门挡水, 静力计算。

工况 II:  $\nabla 275.0$  米水位, 事故门挡水, 静力计算。

工况 III:  $\nabla 275.0$  米水位, 工作门挡水, 静载加垂直水流向地震静动力计算。

工况 IV:  $\nabla 275.0$  米水位, 工作门挡水, 静载加顺水流向地震静动力计算。

工况 V:  $\nabla 275.0$  米水位, 事故门挡水, 静载加垂直水流向地震静动力计算。

工况 VI:  $\nabla 275.0$  米水位, 事故门挡水, 静载加顺水流向地震静动力计算。

3 材料特性:

2 号进水塔塔体和基础系统共有三种材料, 它们分别是: 塔体及底板采用 250#混凝土, 静弹模  $2.85 \times 10^4 \text{Mpa}$ , 塔基大体积混凝土为 150#, 静弹模为  $2.3 \times 10^4 \text{Mpa}$ , 回填混凝土 100#, 静弹模  $1.85 \times 10^4 \text{Mpa}$ , 它们的容重为  $2.4 \text{t} / \text{m}^3$ , 泊松比为 0.167, 基岩变形模量为  $8 \times 10^3 \text{MPa}$ , 容重  $2.62 \text{t} / \text{m}^3$ , 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 静力分析成果

4.1.1 静位移

在计算中, 我们得出全部方案的静位移, 限于篇幅本文只给出  $\nabla 283$  高程 XY 平面结点 Y 向和 Z 向的最大位移值, 如表 2 所示。

表 2  $\nabla 283.0$  米高程最大位移及发生位置 单位: mm

	Y 向		Z 向	
	最大值	发生位置	最大值	发生位置
工况 I	-2.54	1 点	-3.53	1 点
工况 II	-1.81	同上	-3.14	同上

由表 2 可以看出, Y 向和 Z 向最大静位移均发生在第一节点, 这表明塔体在静荷作用下顶部倾向上游。这主要是由于塔体的重心偏向上游所造成的。因结构及荷载对称, 垂直于对称面的 X 向位移较小, 其最大值只有 1.98mm。

4.1.2 静应力

在静荷作用下, 工况 I 和工况 II 的 X、Y、Z 三个方向的最大拉应力分量分别 1.96MPa、1.46MPa、1.58MPa, 而最大压应力分量分别为-7.14MPa、-2.85MPa、-4.93MPa, 最大拉应力分量是受工况 I 所控制, 而最大压应力分量则受工况 II 控制。这表明, 工作门挡水在侧墙内侧产生较大的拉应力, 事故门挡水在侧墙外侧产生较大的压应力。而对于两种工况的最大主应力可见表 3。

表 3 YZ 平面静主应力最大值及其位置 单位: Mpa

	工况 I			工况 II		
	应力	方向	发生部位	应力	方向	发生部位
$\sigma_1$	1.91	32.45°	642 点	1.59	67.95°	762 点
$\sigma_2$	-4.96	81.60°	794 点	-5.02	81.50°	794 点

由上表可以看出, 在静荷作用下, 两种工况的最大主拉应力均发生在侧墙内侧的门铰附近, 而最大压应力则发生在外侧的同一点, 工作门挡水比事故门挡水时的拉应力略高一些, 其值由 1.59Mpa 增加到 1.91Mpa, 其主拉应力区发生在侧墙的中间区域。而外侧则受较大的双向受压状态, 其主压应力的最大值达到 5.02Mpa, 由事故门挡水控制, 其区域在侧墙外侧的中后部。请参看文献[1]。

4.2 动力分析成果

4.2.1 动位移

①垂直水流向地震位移

在横流向地震时, 主要位移是横向位移 (X) 向, 为便于分析, 我们只给出塔顶 283.0 米上下游面节点 X 向的最大动位移, 见表 4。

表 4 垂直水流向 (X 向) 最大动位移 单位: mm

位置	工况 III	工况 V
上游面	13.13	12.21
下游面	11.32	10.55

②顺水流向地震位移

在顺水流向地震时, 我们给出高度 283 米上下游面节点 Y、Z 向的最大动位移, 见表 5。

比较上表和表 2 可以看出, 发生在塔顶的动位移比静位移在 Y 向要大 5—6 倍, 而 Z 向的动静位移相差无几。

表 5 顺水流向(YZ 方向)最大动位移 单位: mm

位置	工况Ⅳ		工况Ⅵ	
	Y 向	Z 向	Y 向	Z 向
上游面	12.18	3.33	11.50	3.15
下游面	12.15	1.73	11.47	1.63

4.2.2 动应力

在地震作用下，顺河向地震在 Y、Z 方向产生较大的压应力，其最大值为  $\sigma_y=-1.18\text{MPa}$ ， $\sigma_z=-2.28\text{MPa}$ 。而横河向地震使 X、Z 向产生较大的拉应力，其最大值为  $\sigma_x=1.33\text{MPa}$ ， $\sigma_z=2.53\text{MPa}$ 。在 X 方向产生的拉应力，横河向地震是顺河向地震的 2.4 倍。

4.2.3 静动迭加应力成果及其分析

根据“最不利原则”我们进行了静力与动力的组合，从而求出各方案的主应力如表 6 所示。

表 6 YZ 平面静动组合主应力最大值及发生部位 单位: Mpa

	工况Ⅲ		工况Ⅳ		工况Ⅴ		工况Ⅵ	
	应力	发生部位	应力	发生部位	应力	发生部位	应力	发生部位
$\sigma_1$	2.69	985 点	2.58	762 点	2.53	985 点	2.24	762 点
$\sigma_2$	-5.98	558 点	-6.09	558 点	-5.94	794 点	-5.87	558 点

顺水流向地震最大主应力值对照表列于表 7。

表 7 顺水流向地震最大主应力值对照表 单位: Mpa

		静荷	静荷+顺震	提高率(%)
工作门挡水 (工况Ⅳ)	拉	1.91	2.58	35
	压	-4.96	-6.10	23
事故门挡水 (工况Ⅵ)	拉	1.59	2.24	40.8
	压	-5.02	-5.87	17

由以上两表可以看出:

- ①在顺河地震情况下，拉应力提高率大约是 40%，而压应力的提高率则相对小些，约为 20%。
- ②垂直水流向地震时最大主拉应力由原来的 762 号节点（侧墙内侧，高程 218.0m，桩号 39.65m）变化到 985 节点（侧墙外侧，高程 209.0m，桩号 35.75m）上。这说明在垂直水流向地震时，侧墙外侧与闸底板交界处产生了较大的拉应力。
- ③相比较而言，在所有工况中，工作门挡水加侧向地震时产生最大主拉应力，其值为

2.69Mpa，位于（-1.5，33.8，209.0），而最大主压应力受事故门加顺河地震所控制，其值为-6.10Mpa，位于（-1.5，28.6，210.5）。

④综合各方案，无论是顺河地震还是侧向地震，所产生的最大主应力值变化不大，最大主位应力由 2.24Mpa 增加为 2.69Mpa，最大主拉应力值由-5.78Mpa 变为-6.10Mpa。

4.3 新老方案的比较

为便于分析，特列出新，老方案在各种工况下产生的最大主应力值，见表 8。

由表 8 可以看出：2 号塔流通局部加厚后能有效地减少流道侧墙的主拉应力值，且在各工况下主拉应力值的减小率均在 40% 以上。而主压应力的减小率则相对小些，约为 20%，这可能是由于边墙加厚塔体自重增加所引起的。

表 8 新老方案各种工况最大主应力值对照表      单位: Mpa

工况	主拉应力( $\sigma_1$ )		减少率(%)	主拉应力( $\sigma_2$ )		减少率(%)
	新方案	老方案		新方案	老方案	
工况 I	1.91	3.46	45	-4.96	-6.38	22
工况 II	1.59	3.12	49	-5.02	-6.49	23
工况 III	2.69	4.70	43	-5.98	-7.45	20
工况 IV	2.58	4.33	40.4	-6.01	-7.24	16
工况 V	2.53	4.54	44	-5.94	-7.51	21
工况 VI	2.24	3.93	43	-5.87	-7.29	20

5 主要结论

- 综上所述，通过对 2 号明流进水塔修改方案的静动力计算分析，可得主要结论如下：
- 5.1 在所有计算工况中，工作门挡水加垂直河流向地震（工况 III）工况下，结构的内力及应力值均为最大。
- 5.2 地震荷载对塔体的拉应力影响较大，而对塔体压应力的影响则小些。
- 5.3 在弧形工作门段侧墙外侧与闸底板交界处，产生了较大的拉应力，工况 III 的最大主拉应力达到 2.69Mpa，是所有工况中的最大值，但是该拉应力区域不大，仅限于侧墙与闸底板的交界处。
- 5.4 弧形工作门段侧墙内侧有较大的拉应力，顺河向地震时所产生的最大拉应力达到 2.58Mpa（这个拉应力值采取适当工程措施是可以满足要求的）。工作门挡水时侧墙的最大拉应力大于事故门挡水时的最大值，原因是工作门挡水时，弧门推力通过大梁在侧墙上产生了一定的拉应力。
- 5.5 工作门闸室侧墙内侧出现的主拉应力区主要是由塔外水压力所引起的。
- 5.6 流通侧墙局部加厚能有效地减小流道侧墙的拉应力及压应力，是一种很理想的减小侧墙大区域应力、特别是拉应力的工程措施。

（下转 52 页）

(4): 802-808.

## Automatic Generation of Mesh and Check of Result Correctness for Surface of Machine Parts

Zhang Dexian   Chen Riyao   (HuaZhong Univesity of science and Technology)

Li Xinsheng   Hou Bojie   (Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, based on the concrete investigation of structure peculiarity of machine parts, the algorithm of automatic generation of mesh is made a thorough study. Effective and reliable rules relating to generate nodes and elements are presented. A method of checking up result correctness is also given. Two typical examples are employed to illustrate the algorithm.

**Keywords:** machine parts, Surface mesh, automatic generation

(上接 18 页)

### 参 考 文 献

- 1 周鸿钧等. 黄河小浪底水利枢纽2号明流洞进水塔结构静动力分析研究. 郑州工学院应力分析及抗震研究室. 1991. 12
- 2 袁明武等. 微机上的结构分析通用程序使用说明. SAP84, V3.1. 北京大学力学系
- 3 陈厚群等. 黄河小浪底水利枢纽进水塔群结构安全动态分析研究. 北京水利水电科学研究院. 1991. 6
- 4 张伯艳. 杨佳梅. 小浪底3号进水塔的静动力分析. 土木工程学报. 1993. 1

## Static and Dynamic Analysis for the Revising Scheme of the Tower of NO.2 in Xiao Lang Di Project

Zhou Hongjun   Hu Liangming

(Zhengzhou Institute of Technology)

**Abstract:** In this paper, 8—21 node solid elements are used to divide the Xiao Lang Di No.2 Intake Tower. In consideration of 6 different schemes, the static and dynamic analysis is presented. The stress state of the flow tunnel and the safety of the tower stability are evaluated. Some useful conclusions are given, which might be used as the basis of designing.

**Keywords:** Intake Tower, Finite Element Method, Static and Dynamic Analysis