

大型进水塔的三维有限元动力分析*

周鸿钧 张五岳

(郑州工学院应力分析及抗震研究室)

摘 要: 本文用三维有限元法对黄河上某拟建水库的明流泄洪洞进水塔进行了动力分析, 得到了一些有益的结论, 为工程设计提供了可靠依据。

关键词: 三维有限元, 进水塔, 动力分析。

中国图书分类号: TV312

进水塔位于水库的泄洪洞, 发电灌溉引水隧洞的首部, 是引水、泄水系统的控制性水上建筑物。通常, 这类建筑物分为框架式、封闭式和淹没井洞式三种。框架式和淹没井洞式进水塔因力学性能不佳, 一般用于较小规模的水库。而封闭式进水塔则用于高水头下, 用以引泄大流量, 堪称为大型进水塔。它大多位于水库的最深处, 孤立细高, 受风浪、库水及地震的影响较大。它的破坏对水库(特别是挡水坝为土坝)在地震情况下的安全与完整起着举足轻重的作用。因此, 研究工程实际中的大型进水塔不仅对国民经济建设有重大意义, 而且在揭示塔架结构的力学规律方面也有一定的理论价值。

1 大型进水塔结构的动力分析方法

长期以来, 进水塔因其孤立细高的特点总是被人们简化为悬臂梁来分析。居荣初等人曾研究了和刚性地基固结的圆筒和椭圆筒与水的耦振问题⁽¹⁾; 朱永谊等就近海塔结构——土壤——液体三者的相互作用问题, 用微分方程通解法进行深入的研究, 分析了基础柔性、水深变化、液面晃动及液体可压缩性的影响⁽²⁾。朱永谊等建立的模型是进水塔结构比较理想的物理模型。然而, 人们不能忽视实际工程结构中体型复杂、截面突变、变刚度、塔上设备、大孔口等因素对进水塔力学性能的影响。利用上述方法, 把结构简化为截面单一、几何形状规则、忽略大孔口及塔上设备的悬臂加以计算, 其结果对于实际工程结构来说只能是粗略估算, 不可能准确地反映结构各部的应力状态。

* 收稿日期: 1991-05-09

2 用有限单元法分析大型进水塔的动力及动力反应

地震作用下, 结构—库水—地基系统的有限元方程是:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = -[M]\{G(t)\} \quad (1)$$

式中: $[M]$ 是结构—库水系统的质量矩阵, $[C]$ 为系统的阻尼矩阵

$[K]$ 为系统的刚度矩阵, $\{G(t)\}$ 为地面加速度列阵

\dot{u} 和 \ddot{u} 是节点的速度和加速度

本文用 Westergard 法计算水的附加质量, 不计基础质量, 将其简化为弹簧考虑地震输入。

2.1 自振特性分析方法

本文采用子空间迭代法求解结构的固有频率。

首先, 选取 q 个初始迭代矢量形成子空间 E_1 , 然后对 $P(P < q)$ 个向量用同时逆迭代和 Ritz 向量分析, 在子空间上求解特征值, 具体迭代步骤是:

对于 $K = 1, 2, \dots$, 从第 k 次迭代得到迭代空间 E_k 到第 $k+1$ 次迭代得到的向量所张的空间 E_{k+1} 有一般公式:

$$[K][X_{k+1}] = [M][X_k] \quad (2)$$

然后求算子 $[K]$ 和 $[M]$ 在 E_{k+1} 上的投影算子:

$$[K_{k+1}] = [\bar{X}_{k+1}]^T [K] [\bar{X}_{k+1}] \quad (3)$$

$$[M_{k+1}] = [\bar{X}]^T [M] [X_{k+1}] \quad (4)$$

这里 K_{k+1} 和 M_{k+1} 是正 q 阶矩阵 ($q < n$)。

用 QL 法求解子空间上的特征值。

$$[K_{k+1}][Q_{k+1}] = [M_{k+1}][Q_{k+1}][\Lambda_{k+1}] \quad (5)$$

$$\text{求得特征向量的改进近似: } X_{k+1} = [\bar{X}_{k+1}][Q_{k+1}] \quad (6)$$

只要起始向量组不与所要求的任何一个特征向量正交, 则

当 $\rightarrow \infty$ 时,

$$\Lambda_{k+1} \rightarrow \Lambda = \text{diag}(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_p) \quad (7)$$

$$[X_{k+1}] \rightarrow [\Phi] = [\Phi_1, \Phi_2, \dots, \Phi_p] \quad (8)$$

当迭代收敛后用 Strum 序列检查特征向量有无遗漏。

2.2 动力响应分析

令 $\{u\} = [\Phi]\{Q\}$

据特征向量的正交性:

$$\begin{aligned} & [\Phi]^T [M] [\Phi] \{Q\} + [\Phi]^T [C] [\Phi] \{Q\} + [\Phi]^T [K] [\Phi] \{Q\} \\ & = -[\Phi]^T [M] \{G(t)\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned}
 \text{由于: } \{\Phi_i\}^T [M] \{\Phi_j\} &= \begin{cases} 1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \\
 \{\Phi_i\}^T [C] \{\Phi_j\} &= \begin{cases} 2\zeta_1 \omega_1 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases} \\
 \{\Phi_i\}^T [K] \{\Phi_j\} &= \begin{cases} \omega_1^2 & i=j \\ 0 & i \neq j \end{cases}
 \end{aligned} \tag{10}$$

得到一组解耦的二阶常系数微分方程

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_1 \omega_1 \dot{q}_i + \omega_1^2 q_i = f_i(t) \tag{11}$$

用逐步积分法可以求各阶模态的历程响应。

3 地震谱反应分析

抗震设计常根据地震反应在整个振动过程中结构的最大反应考虑。抗震规范中的设计反应谱是按各类地震记录计算的一系列频率下最大反应谱值。依此设计反应谱得到的结构动力响应是判断结构安全的重要依据。

方程(11)的解用杜哈梅积分表示为:

$$q_{is} = -\frac{\eta_{is}}{\omega_{is}} \int_0^t G_{is}(t) \sin \omega_{is}(t-\tau) d\tau \quad (s=x, y, z) \tag{12}$$

令 $|G_{is}(+)|_{\max} = K_{is} \cdot g$, 式中 K_{is} 是水平向地震系数。

据反应谱 β - T 曲线, 可以得到各阶模态的位移反应 $q_{is}(t)$ 的最大值:

$$q_{is} = |q_{is}(t)|_{\max} = \frac{|\eta_{is}|}{\omega_{is}^2} \beta_1 \cdot K_{is} \cdot g \tag{13}$$

式中 η_{is} 为 S 方向的振型参与系数, β_1 为周期为 T_1 时的加速度反应谱值。本文采用完全平方组合法将各振型应力进行组合

4 工程实例

4.1 工程概况

某水库共有九座大型综合进水塔, 呈“一”字型排列, 总长 255.9 米, 塔与塔之间以结构缝分开, 并在一定高程以下灌浆固结。本文所计算的塔塔高 108.0 米, 顶部高程 ∇ 283, 岩基面高程 ∇ 175.0, 闸底板高程 ∇ 209.0 米。该进水塔由检修门井, 事故门井和工作井组成, 在每个门井内的不同高程上又设置平台布置设备。进水塔从 ∇ 283.0 米至 ∇ 205.2 米为复杂的箱格结构, 采用 250[#]混凝土, 弹模 $E=2.85 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 从 ∇ 205.2 米至 ∇ 175.0 米为大体积混凝土, 塔基采用 150[#]混凝土, 弹模 $E=1.85 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$, 基岩为砂岩, 弹模 $E=8 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$

从总体来看, 该进水塔在垂直河流向上左右对称。

4.2 模型简化

取单独的塔来计算, 在顺水流方向地震时, 不考虑塔与塔之间的相互作用, 取基岩范围为 0.7 倍的塔高, 建立正对称模型。在垂直水流向地震时, 考虑 $\sqrt{205.2}$ 米以下塔与塔之间的相互约束, 约束 $\sqrt{205.2}$ 米面上各点自由度, 并令对称面上顺河向和竖向位移均为零, 建立反对称模型。图 1 为正对称模型网格图。

对称模型有 1329 个节点, 3441 个自由度, 34 个板单元, 180 个三维 8—21 节点等参元和 88 个三维非协调六面体单元, 半带宽是 117; 反对称模型采用 1117 个节点, 2813 个自由度, 34 个板单元, 159 个三维 8—20 节点等参元, 半带宽 136。

本文用正、反对称模型计算了 $\sqrt{275.0}$ 米水位、空库等情况下的自振特性和动力反应。

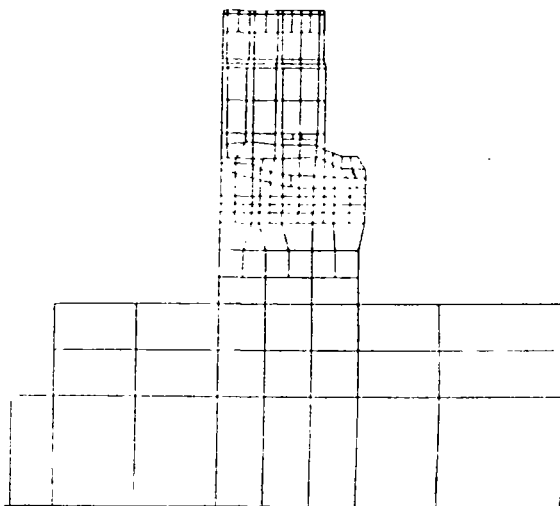


图 1 正对称模型网络图

5 计算结果

5.1 固有特性分析

本文用子空间迭代法求解了进水塔在各种情况下的自振频率, 列于表 1 和表 2。 f_1 、 f_2 分别为 $\sqrt{275.0}$ 米水位下工作门挡水和事故门挡水时的自振频率, f_3 是空库频率, f_4 、 f_5 分别为空库不计塔上设备和空库不计地基柔性影响两种情况下的自振频率。图 2 为正对称模型振型图。

表 1 正对称模型自振频率

分类	振 型					
	I	II	III	IV	V	VI
f_1	2.2018	7.1709	7.6527	13.3772	17.8381	19.3363
f_2	2.2837	7.2678	7.6486	13.5368	17.8864	19.6840
f_3	2.4568	7.4519	7.7081	14.1172	17.4212	20.5684
f_4	2.5157	7.5919	7.8112	14.3502	18.3144	20.9399
f_5	3.0461	9.0880	9.9261	17.0106	22.7961	23.8738

计算结果表明, 塔内的水使第一阶自振频率降低 2.5—3.5%, 塔外的水使第一阶频率降低 7% 左右, 塔内塔外的水使第一阶自振频率降低 10% 左右, 而且对于正对振型而言随频率增大, 水的影响减小很快。而对于反对称振型而言, 随频率增大水的影响减小幅度较小。

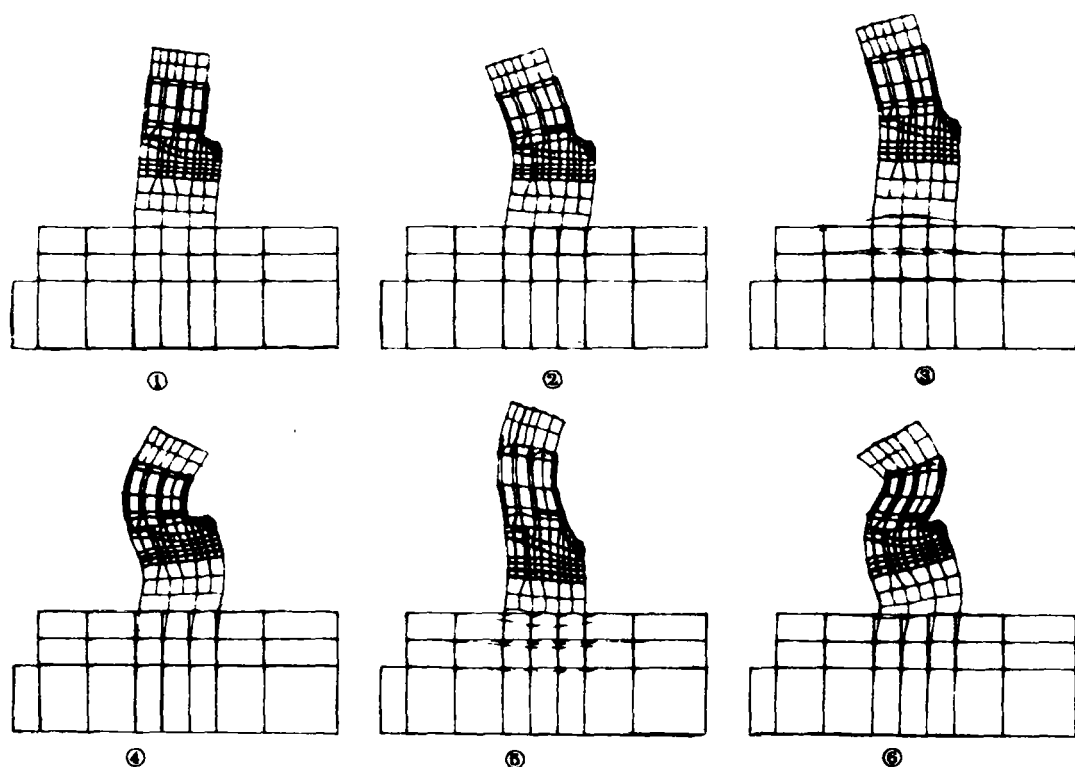


图 2 正对称模型振型图

表 2 反对称模型自振频率

分类	振 型					
	1	2	3	4	5	6
f_1	2.1279	6.6617	7.2784	12.2342	14.2731	16.7289
f_2	2.2000	6.8040	7.3132	12.3000	14.6055	16.9569
f_3	2.3032	7.2109	7.8676	13.1794	15.3937	18.4677
f_4	2.3727	7.3719	7.9806	13.6868	15.7910	18.7411

塔上设备使塔的第一阶频率降低 2—3%，而对于高阶频率影响很小。

地基柔性使进水塔的自振频率降低 20% 左右。

分析塔体的振型形状发现：正对称振型的第一、二、四振型以水平位移(即顺河向)为主，第三、五阶振型以竖向位移为主，并且均表现为二维平面内的运动；反对称振型则表现为空间运动，第一、二、五振型以水平位移(即垂直河向)为主，第三、四阶振型为绕竖直轴向的扭转，第六阶振型则表现为非刚体位移。

总的来讲，液固耦合使第一阶自振频率降低 10% 左右，地基柔性影响使自振频率降低 20% 左右；突变截面的存在虽然对第一阶振型的形状性质没有影响，但却严重地影响着其位移的分布，严重影响着高阶振型的形状。

5.2 地震反应分析

由于突变截面的存在，使得垂直水流向地震位移在该处上、下游端的值相差很大，达到 38.5%，并在截面突变处产生应力集中。

无论是顺水流地震还是垂直水流向地震,地震正应力在上部与静力相比增加较大,最大可达 80%;在下部增加较小,约为 20%左右。水平面内顺水流向的剪应力在塔下部增大较多。

从总体上看,顺水向地震所产生的地震应力具有悬臂梁弯曲特点,同一高程的截面上,上、下游端处的竖向应力大小相等,方向相反,剪应力呈两端小中间大的趋势分布。垂直水流向地震应力具有板弯曲特征,侧墙外侧的应力增加幅度较大,而墙内侧较小。

6 结 论

6.1 库水对进水塔的影响很大,使第一阶自振频率降低 10%。因此,在进水塔动力分析时不能忽略水和影响。

6.2 地基柔性的影响,使塔体自振频率降低 20%左右,远比水的影响要大应优先考虑。

6.3 突变截面及大孔口的存在不仅会产生应力集中,而且还要改变塔体的自振频率和振型形状,影响着结构的地震应力。因此对于大型进水塔的动力分析宜用有限元法计算,而不宜采用把结构简化为悬臂梁计算的解析法。

6.4 地震应力在塔体上部增加较大,这是由于塔顶设备的集中质量所致。虽然,塔上设备对自振频率影响不大,但对结构局部应力的影响则是不容忽视的。

6.5 分析结构的组合应力看出,细高的塔(即横向最大尺寸与塔高比大于 3.0)可能发生弯曲破坏,小于 3.0 的可能发生剪切破坏。

6.6 计算表明原结构流道侧墙后部的强度不能满足要求,应考虑专门措施,图 2 为其主应力图。

参 考 文 献

- (1) 居荣初,曾心传. 弹性结构与液体的耦联振动理论. 地震出版社, 1983
- (2) 朱永谊,翁智远,吴家龙. 近海塔式结构的水——土壤——圆柱动力相互作用——自由振动, 土木工程学报, 第二十二卷, 第 2 期, 1989.2
- (3) 王良琛. 混凝土坝地震动力分析. 地震出版社, 1981
- (4) 张汝清,殷学纲,董明. 计算结构动力学. 重庆大学出版社, 1987

Dynamic Analysis of Large Intake Tower by Using three-dimensional Finite Element Method

Zhou Hongjun Chang Wuyao
(Zhengzhou Institute of Technology)

Abstract: In this paper, the three-dimensional finite element method is used to investigate the dynamic response of Xiaolangdi reservoir intake tower. Some useful conclusions are obtained. The achievement of the analytical computation has been used to the production.

Keywords: three-dimensional finite element method, intake tower, dynamic analysis