

天生桥水电站 进水塔空间有限元结构分析

马立鹏 右瑞昌 王亦锥

(能源部、水利部昆明勘测设计院)

摘 要: 本计算以整个进水塔为研究对象,对塔体单元进行了详细剖分,并截取了相当于一倍塔高的基础,是一紧密结合工程实际的大型空间有限元分析课题。计算工况分为运行期及封堵期两种,封堵期又对后加山体支撑和不加山体支撑进行了对比分析论证。通过分析,摸清了进水塔整体及重点部位的受力状况、应力应变规律,解决了结构力学分析方法所不能解决的问题。本分析成果已用于生产实际中,对即将动工兴建的天生桥一级电站进水塔的体型优化、结构配筋起到了指导作用。

关键词: 进水塔,空间有限元,结构分析

中国图书分类号: TV732

天生桥一级水电站位于贵州、广西两省(区)交界的南盘江干流上,是红水河梯级开发中的“龙头”电站,总装机容量为 120 万 kW。主要水工建筑物有:178m 高的钢筋混凝土面板堆石坝、开敞式溢洪道、放空隧洞、引水发电隧洞及地面式厂房、导流隧洞等。

两条导流隧洞位于左岸、中心间距 50m,断面为 13.5×13.5 m 修正马蹄型,由引渠、进水塔、洞身段及出口消能段组成。进水塔为一高为 45m 的大体积混凝土建筑物,内设中墩,将进口分为二孔,各设 6.5×13.5 m 平板工作闸门一道。塔顶平台高程为 682.0m,进口底板高程为 637.0m。

导流隧洞担负施工期导流任务,右坝体填筑高程达到一定高度可拦洪蓄水时,需以封堵。此时,进水塔下闸挡水,导流洞内堵头开始施工。进水塔结构的可靠性直接关系到堵头的顺利施工及水库蓄水,关系重大。以往的进水塔结构分析多采用结构力学法截取典型断面进行,对塔身整体结构的内力分布情况没有系统了解,对闸墩、底板等关键部位的应力情况亦不清楚。因此,拟对进水塔进行空间有限元分析,研究其整体及重点部位的受力状况,应力应变规律等,为进一步优化设计、结构配筋提供依据。

1 模型简化

1.1 计算范围 计算模型基本尺寸见图 1、图 2。

本计算以整个进水塔为研究对象。基础深度取一倍塔高,基础长宽方向取其一倍尺寸,见图 3。

1.2 边界条件简化

1.2.1 进水塔为对称结构,其荷载亦对称,为简化计算,沿进水塔中墩中心线取一

半作为对称结构进行计算。

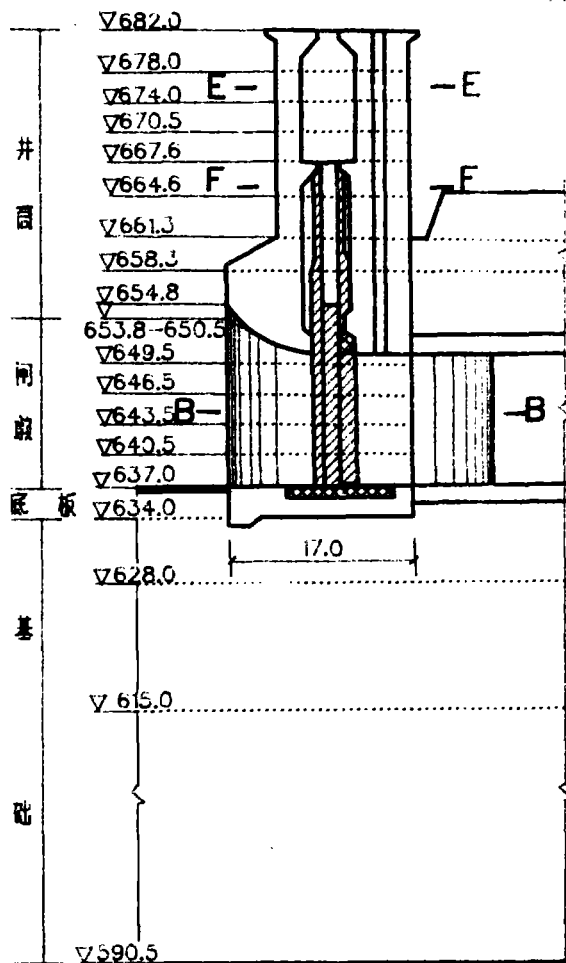


图1 (单位: m)

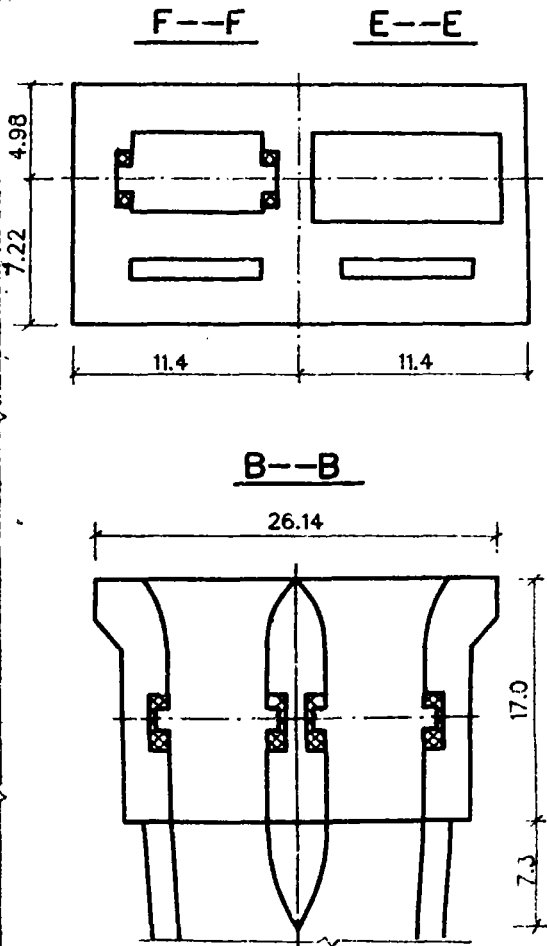


图2 (单位: m)

1.2.2 所取基础范围下部(590m 高程平面)及四周可视为无限域,相应其边界单元节点的位移均很小,可忽略,予以约束。

1.2.3 所取对称结构面的法向位移亦予约束。

1.2.4 结构分缝处,如中墩与尾墩交结处,因缝宽一般为1~2cm,缝中填物多为柔性,而有限元分析计算的节点位移值一般为毫米数量级,故这些地方的节点有予约束,按自由节点考虑。

1.3 结构局部简化

对塔体结构中一些对结构受力影响很小的局部,如为满足闸门安装下闸等要求而挑出的带形牛腿等,在单元划分时将其略去。二期混凝土部分(图1中以阴影线示出),全部略去,不考虑其参加受力,使这些部位的结构设计留有余地。

2 计算参数

进水塔基岩为砂岩与泥岩互层 (T_{26}^{2-2} 及 T_{26}^{2-1} 层), 岩性较差。岩石及混凝土计算力学参数取值见下表。

材料参数表

表 1

材 料	容重 γ (t/m^3)	弹模 E (GPa)	剪切模量 G (GPa)	泊松比 μ
岩 石	2.7	E_{II} 9.63	3.05	0.25
		E_I 5.5		
混 凝 土	2.45	26.0	11.18	0.17

3 荷载工况

导流隧洞主要工况为运行期和封堵期两种, 不考虑地震的影响。

3.1 运行期

运行期, 导流洞过流, 运行水位取 722m 高程。此时, 整个进水塔处于水下, 由于流速水头及进口局部水头损失的影响, 进水塔井筒内外水头存在一个差值。

$$\text{水头差 } (\Delta H) = \text{进口局部水头损失 } \left(\zeta \frac{v^2}{2g} \right) + \text{流速水头 } \left(\frac{v^2}{2g} \right)$$

经计算, 水头差值按 34m 考虑。

3.2 封堵期

封堵期水库水位为 682m 高程, 与进水塔平台高程齐平。闸门下闸挡水后, 由于闸门是后止水, 闸门槽内的水位与水库水位持平, 而闸门以后部位及通气孔内水压为零。

进水塔中墩及边墩在闸门下闸挡水时承受了闸门传来的很大的水推力。闸门作用在二期混凝土上的力是以轮压的形式传递的, 但考虑到二期混凝土的传递、均化作用, 加之各轮压分布基本均匀, 因此, 作用在二期混凝土结构上的力可近似按均布荷载考虑, 取值 $p = 1.3 \text{ MPa}$ 。

4 空间有限单元划分

本计算采用 SAP5 程序, 在 VAX 计算机上运行。单元类型采用 SAP5 第 8 类“8~21 节点单元”。单元划分时, 自上而下水平层层划分。塔身单元划分较细, 共 953 个单元; 基础单元及后部山体单元划分较粗, 共 480 个单元。参见图 1 及图 3

总单元数: 1433 (个)

总节点数: 2298 (个)

总自由度: 大于 6000 (个)

封堵期分两种情况进行分析计算:

CASE(1)——考虑进水塔后部山体的支撑作用;

CASE(2)——不考虑进水塔后部山体的支撑作用(即将后部山体单元填为空单元)。

5.2.1 井筒部分

井筒部分正剪应力值均很小。由于闸门是后止水,通气孔内水压为零,在通气孔内缘产生了较小的拉应力,见图5。CASE(1)、CASE(2)应力情况变化不大。

5.2.2 闸墩部分

由于闸门推力以及门槽后部空腔的影响,闸墩部分产生了较大拉应力和剪应力。以下就CASE(1)、CASE(2)两种情况分述如下。

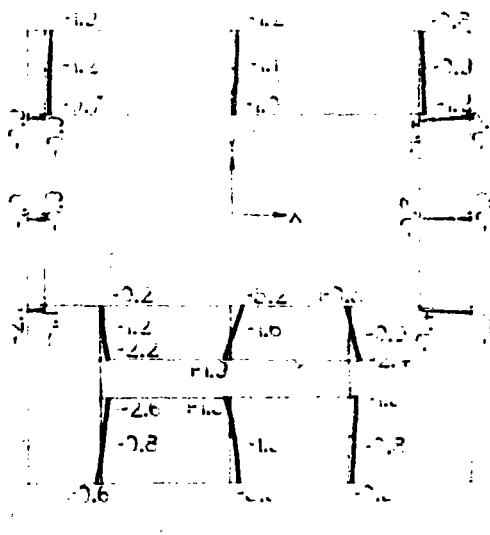


图5 封堵期672.3高程断面 σ_x 、 σ_y 应力分布(单位: 10^5Pa)

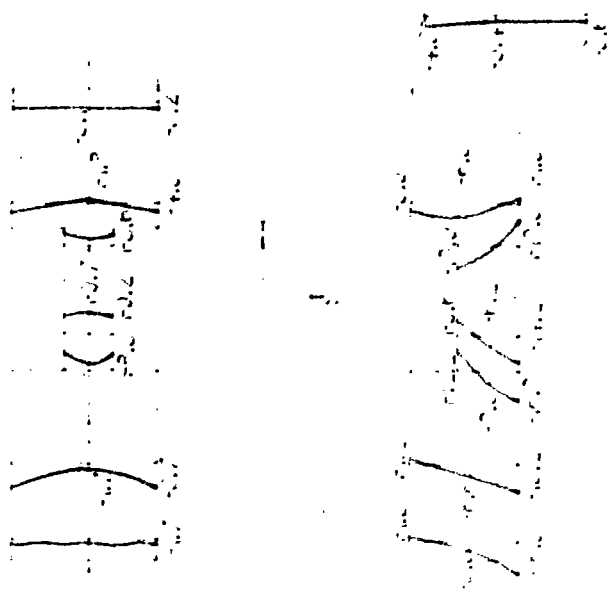


图6 封堵期643.5高程断面 σ_y 应力分布(单位: 10^5Pa)

CASE(1) 考虑后部山体支撑:

闸墩中部(643.5m高程)区域,中墩颈部为全断面受拉($\sigma_{y\max} = 0.97 \text{MPa}$),边墩颈部为部分区域受拉($\sigma_{y\max} = 1.22 \text{MPa}$),见图6所示。但底部(637.0m高程)及上部(650.5m高程)断面未出现大的拉应力,基本为压应力;

闸墩上部及下部断面产生了较大的 τ_{zy} 、 τ_{zx} 剪应力($\tau_{zy\max} = 2.0 \text{MPa}$, $\tau_{zx\max} = 1.45 \text{MPa}$)。中部断面剪应力值很小。这类似于在均布荷载作用下的简支梁剪力分布规律。实际上,闸墩部分在闸门水推力的作用下受到了基础及后部山体的约束,其情形也类似于在均布荷载作用下的简支梁,因此,上述剪应力分布是合理的。其中, τ_{zy} 是由于闸门水推力引起的, τ_{zx} 是由于门槽后部空腔及外部水压引起的。篇幅有限,上述断面 τ_{zy} 、 τ_{zx} 应力图在此未予示出;

虽然在上、下两个断面出现了较大的剪应力,但由剪应力和正应力复合而成的主应力

5.2.3 底板部分

CASE(1)、CASE(2)两种情况应力值很小,混凝土与岩石交界面剪应力值很小。

6 总结

通过以上分析,可以得出如下结论。

6.1 运行期和封堵期相比,封堵期为控制情况。6.2 当后部有山体支撑时,进水塔整体受力情况有明显改善,闸墩前趾不出现拉应力。这与直观判断是一致的。因此进水塔的设计以将下游侧与山体联接浇筑为宜,进水塔与隧洞进口间的沉降缝应简化处理,不设沥青玛蹄脂,使其能在y方向上传递塔身的水平推力。

6.3 封堵期重点受力部位是闸墩颈部,因这一部位结构较为单薄,需加强配筋。

6.4 对进水塔可进行优化设计,井筒部分厚度可适当减薄,或减少钢筋用量。

6.5 与结构力学法相比较,有限元计算结果配筋量可以大为减少。如井筒672.3m高程断面按结构力学法需 $20\Phi 26/m$ 的配筋方能满足要求,但按有限元法计算,则用一般构造配筋即可。又如,中墩颈部用传统方法估算,应力达2.82MPa,远大于混凝土抗拉强度,为满足强度要求,需配置 $20\Phi 34/m$ 的钢筋,而有限元计算 $\sigma_{y\max} = 0.97\text{MPa}$, σ_1 亦接近于这个值,小于混凝土抗拉强度,配筋可减少。二者之间的差异,主要是传统方法未能反映整体受力情况之故。

6.6 用结构力学法对类似进水塔一类的大体积混凝土建筑物进行结构分析显然是不合适的。但空间有限元分析工作量大、耗时长,对不同进水塔都进行如此详尽的分析是不太可能的。为此,今后需寻求一种相对简单有效的分析方法,以解决进水塔这一常见水工建筑物的结构分析问题。

※ 本文在计算、编写过程中得到张宗亮工程师,颜震威高级工程师的热情指导,在此表示感谢。

Upper Tianshengqiao Hydroelectric Project Space Finite Element Structural Analysis of Diversion Tunnel's Intake Tower

Ma Lipeng Gu Ruichang Wang Yizhui
(Kunming Hydroelectric Investigation Design Institute)

Abstract: In this paper, we take the whole intake tower as a study object. We divided the tower's element's in detail, and cut a rock foundation as high as the tower's height. It is a large space finite element structural analysis, which is closely integrated with engineering practice. As a guide of optimizing design and structural reinforcement of intake tower, which is nearing construction in the upper Tianshengqiao hydroelectric station, the achievement of this analysis has been used to the production practice.

Keywords: Intake tower, Space finite element, Structural analysis