

强震区水电站中大跨度高框架建筑物设计研究

胡冰, 谭盛凛, 阳运生

(中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 朝阳 100024)

摘要:为保证水电站运行要求,建设大跨度高框架建筑物往往不可避免,同时,其抗震性关系到整个工程的安全和效益。结合苏洼龙水电站主变开关楼工程实例,通过建立 PKPM 计算模型,研究了多项有效抗震的结构措施,满足了建筑物强震下楼层侧向剪切刚度、楼层剪重比、层间位移角等要求,提高了框架结构的抗震性。

关键词:结构设计;强震区;结构刚度;框架建筑物;PKPM

中图分类号: P315.9;[TM622];TU323.5

文献标识码: A

文章编号: 1001-2184(2022)02-0051-04

Study on Design of Large-span and High-frame Buildings for Hydropower Stations in Strong Earthquake Areas

HU Bing, TAN Shenglin, YANG Yunsheng

(Beijing Engineering Co., LTD, Chaoyang, Beijing, 100024)

Abstract: In order to ensure the operation requirements of hydropower stations, the construction of large-span and high-frame buildings is often unavoidable. At the same time, its earthquake resistance is related to the safety and efficiency of the entire project. Combined with the engineering example of the switch building of Suwalong Hydropower Station, this paper studies a number of effective anti-seismic structural measures by establishing a PKPM calculation model, which meet the requirements of floor lateral shear stiffness, floor shear-weight ratio, and inter-story displacement angle, etc. under strong earthquakes, and improves the seismic resistance of frame structures.

Key words: structure design; strong earthquake area; structural stiffness; frame building; PKPM

0 前言

我国规划和在建的大中型水电站多集中在水能资源丰富的西南地区,该地区地震频发,同时,地震烈度较高,这对水电站厂房、开关楼、进水塔等大跨度、高框架建筑物的设计提出了更高的要求。迄今,水电站框架结构抗震结构分析研究已比较充分,然而,对结构抗震具体措施探讨较少^[1]。赵景研究了尾水平台较高、主副厂房之间没有分缝的地面厂房抗震设计,将屋顶与排架铰接连接方式改为简支,在一定程度上提高了厂房的抗震效果^[2]。针对大跨度高框架结构,井向阳采用“加腋”与“加梁”措施提高了框架结构的局部刚度与整体刚度,从而达到了防震抗震的目的^[3]。

在已建的水利水电工程中,大跨度、高框架建筑物抗震措施主要是采用混凝土内部加强配筋的方式^[4]。但是,加强配筋不仅增大了工程投资,还

增大了混凝土浇筑的难度。苏洼龙水电站主变开关楼钢筋混凝土多层框架结构,利用空间有限元分析软件 SETWE,研究了强震工况下,大跨度高框架建筑物抗震设计及其效果,可供类似工程参考。

1 结构抗震设计

苏洼龙水电站主变开关楼布置有主变压器、输电线路终端、开关设备,是电能进行集中、分配、交换和保护的场所。主变开关楼尺寸为 129.0 m × 18.5 m × 46.0 m(长×宽×高),地面以下分为 GCB 层和厂高变层,采用钢筋混凝土结构,强度等级为 C25;地面以上分为主变层、管道层和 GIS 层,采用钢筋混凝土框架结构,强度等级为 C30;同时,建筑物楼顶设有 500kV 出线塔架。主变开关楼沿纵向分为 1、2、3 号及 4 号主变段,其中 1 号主变段,2、3 号主变段,4 号主变段之间设有结构缝。该楼跨度大、楼层高,预留孔洞多,强震下混凝土结构与塔架结构动力作用机理十分复杂。

收稿日期:2022-03-05

苏洼龙水电站主变开关楼结构设防烈度为Ⅷ度,设防地震烈度地震动峰值水平加速度为0.238 g,工程抗震等级为一级。

2.1 结构特性分析

2.1.1 计算荷载

主变开关楼结构计算荷载包括结构自重、楼面荷载、风荷载、雪荷载、机电设备荷载、塔架自重、顶部线路荷载及桥机吊重。

2.1.2 计算模型

首先,在PKPM中建立了主变开关楼框架模型(见图1),同时,考虑到框架结构与塔架结构联合受力,建立了ABAQUS整体模型(见图2),模型嵌固端取在主变开关楼顶面。ABAQUS整体模型计算的塔架基础受力作为输入条件之一施加于PKPM框架模型中。

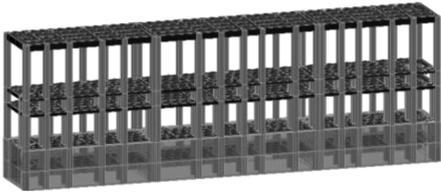


图1 主变开关楼框架模型

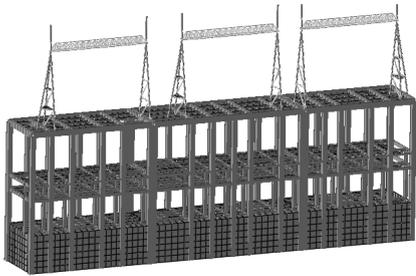


图2 ABAQUS整体模型

2.1.3 设计反应谱

据《水工建筑物抗震设计标准》GB51247—2018,标准设计反应谱参数应符合以下规定^[5]:

(1) 周期小于0.1 s的区段, $\beta(T)$ 取从1.0到 β_{\max} 直线段;

(2) 自0.1 s至特征周期的水平段, $\beta(T)$ 取最大值 β_{\max} ;

(3) 自特征周期至3 s区段, $\beta(T)$ 按公式 $\beta(T)=\beta_{\max}(T_g/T)^{0.6}$ 取值。

苏洼龙水电站工程区50年超越概率10%的基岩动峰值加速度为0.182 g,主变开关楼按50年超越概率5%的地震设防,其基岩水平动峰值

加速度的代表值为0.238 g,地震波反应谱数据见图3。

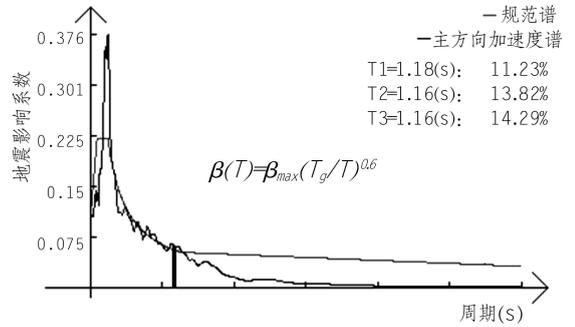


图3 地震波反应谱数据

2.1.4 不利因素分析

2.1.4.1 设备荷载重

苏洼龙主变开关楼单个主变压器重290 t,共4个,仅布置于3根横梁之上;单个塔架重108 t,共3个,布置于屋顶主梁之上。如此大的荷载对主变开关楼结构抗震设计提出了严峻的考验。

2.1.4.2 结构高度大

受地形和场地限制,主变压器、GIS开关系统及出线塔架均布置于一处,建筑物底板至塔架顶部总高度78.0 m。

《建筑抗震设计规范》(2016年版)GB50011—2010规定^[6]:甲、乙类建筑以及高度大于24 m的丙类建筑物,不应采用单跨框架结构;高度不大于24 m的丙类建筑不宜采用单跨框架结构。

苏洼龙主变开关楼工程抗震设防类别为乙类,该楼地面以上高度为32.0 m,其中主变层、管道层两层总高度15.5 m,为双跨框架结构;GIS层层高16.5 m,为单跨框架结构;总体来看,地面以上的结构可称之为“伪单跨框架结构”,结构抗震布置极为不利。

2.1.4.3 考虑因素多

苏洼龙主变开关楼框架结构不仅与钢结构塔架联合受力,同时间接受到0号出线塔的水平与竖向拉力,结构受力复杂。

2.1.5 结构抗震设计

2.1.5.1 合理优化结构体系

(1) 抗震墙—框架结构体系。苏洼龙主变开关楼为抗震墙—框架结构体系,建筑物基础为微风化花岗岩,以弱卸荷为主,地面以下为厚墙结构,高度14.0 m,分为GCB层和厂高变层,具有足够的基础

埋深。地面以上为框架结构,高度 32.0 m,楼板均为现浇混凝土板,具备良好的整体性。

(2)合理设置防震缝。结合楼顶出线塔架布置,沿主变开关楼长度方向设置两道防震缝,将整个建筑物分为三道独立的抗震体系,分别为 1 号主变段(40.70 m),2 号、3 号主变段(50.50 m),4 号主变段(37.35 m)。综合考虑建筑物抗震设防烈度、结构单元高度及地震扭转效应,确定了防震缝宽度为 200 mm,保证地震下建筑物两侧的上部结构单独受力。

(3)细化梁柱节点设计。PKPM 结构设计时,梁柱节点一般设置为固接,对于强柱弱梁,柱相对线刚度比梁柱大得多,在外力作用下,梁端变形受到了柱的约束,在两端产生了支座负弯矩,该负弯矩与外力荷载基本成正比。因此当梁长度较短,外力荷载较大时,支座负弯矩也较大,导致梁端支座极易发生破坏。此处将该梁端设计为塑性铰,降低其支负弯矩。当梁端弯矩较大,超出了该梁截面的受弯承载力后,塑性铰设计可进行弯矩调幅,控制混凝土梁在受力过程的约束条件,有效地释放了梁端弯矩。

根据建筑物不同的受力情况,设置相应的梁柱连接节点(见图 3),有效地保证了结构抗震性能。

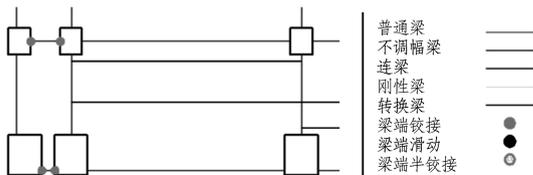


图 4 梁柱连接节点

2.1.5.2 平衡横纵结构刚度

《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3—2010 规定^[7]:高层建筑物结构平面形状宜简单、规则,质量、刚度和承载力分布宜均匀。

主变开关楼 1 号主变段长宽比(L/B)为 2.2;2 号、3 号主变段长宽比(L/B)为 2.7;4 号主变段长宽比(L/B)为 2.0。因此,该建筑物横向(B)刚度远远小于纵向(L)刚度,建筑物在横向方向将会产生较大的地震响应。结构设计时,减少纵向梁截面,增大横向梁截面,减小结构刚度薄弱带的影响,平衡横纵向结构刚度,有效地增强了结构抗震能力。横纵方向主梁布置见图 5。

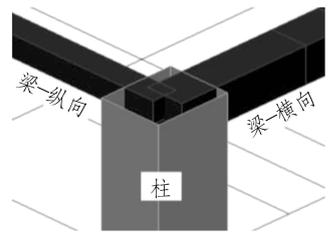


图 5 横纵方向主梁布置图

2.1.5.3 调整结构侧向刚度

《高层建筑混凝土结构技术规程》JGJ3—2010 规定:抗震设计时,高层建筑相邻楼层的侧向刚度变化应符合下列规定:

对框架结构,楼层与其相邻上层的侧向刚度比 γ 可按式(3.5.3-1)计算,且本层与相邻上层的比值不宜小于 0.7,与相邻上部三层刚度平均值的比值不宜小于 0.8。

$$\gamma = \frac{V_i \Delta_{i+1}}{V_{i+1} \Delta_i} \quad (1)$$

式中 γ 为楼层侧向刚度比; V_i 、 V_{i+1} 为第 i 层和第 $i+1$ 层的地震剪力标准值(kN); Δ_i 、 Δ_{i+1} 为第 i 层和第 $i+1$ 层在地震作用标准值作用下的层间位移(m)。

主变开关楼主变层层高 11.0 m,管道层层高 4.5 m,GIS 层层高 16.5 m,层高高度变化极大,如此的层高变化对结构楼层剪力及层间位移极为不利。为了保证建筑物侧向刚度均匀变化,结构设计时采取了以下措施:

(1)强化主变层顶层结构,增加梁截面,结构设计中该层梁高宽比接近 1.0;

(2)弱化管理层顶层结构,减小梁截面,仅布置不可缺少的主梁;

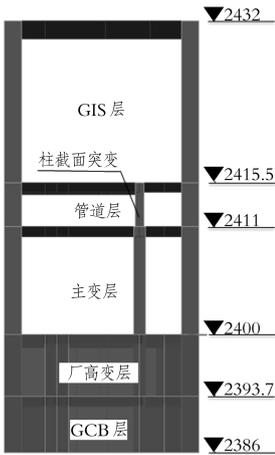
(3)减小管道层内部结构柱截面,最大限度弱化管理层质量及刚度。

通过以上措施,人为地将管道层构建为虚拟层间结构,在侧向刚度角度,原五层结构变为四层:GCB 层、厂高变层、主变层及 GIS+管道层,有效解决了强震下层高高度变化较大的难题。主变开关楼结构和结构侧向刚度示意图见图 6、7。

2.2 计算结果

2.2.1 结构立面规则性

整理主变开关楼计算结果,建筑物楼层多方向剪切刚度比(见图 8)、楼层多方向刚度比(见图 9)均满足规范要求。



单位: m

图6 主变开关楼结构图



图7 结构侧向刚度示意图

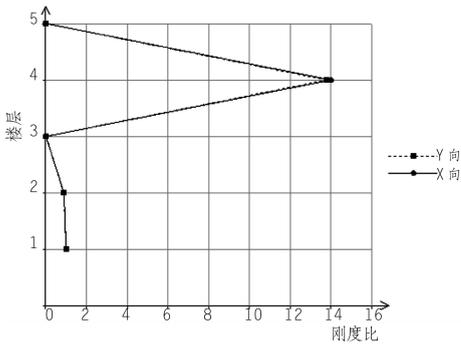


图8 多方向剪切刚度比简图

2.2.2 地震分析及调整

地震工况下,主变开关楼楼层剪力(见图10)和楼层剪重比(见图11)均满足规范要求。

2.2.3 结构楼层位移统计

地震工况下,主变开关楼楼层最大位移(图12)及结构最大层间(图13)位移角均满足规范要求。

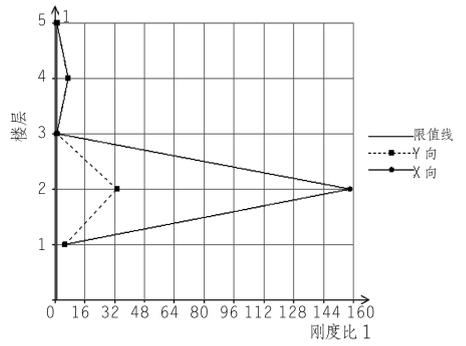


图9 多方向刚度比简图

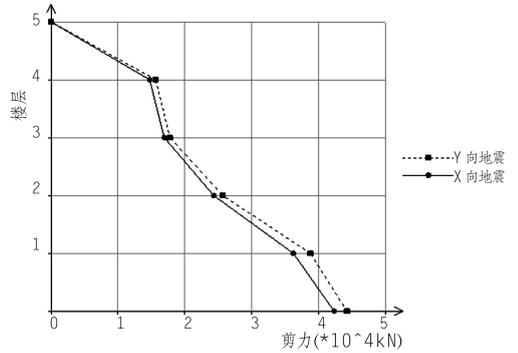


图10 主变开关楼楼层剪力简图

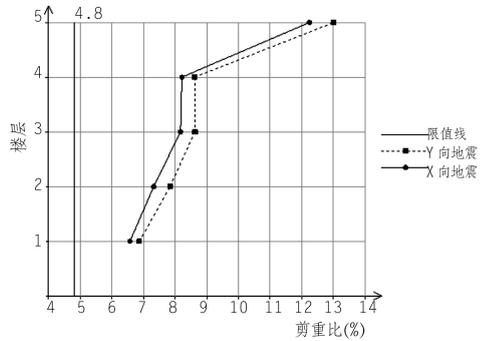


图11 楼层剪重比简图

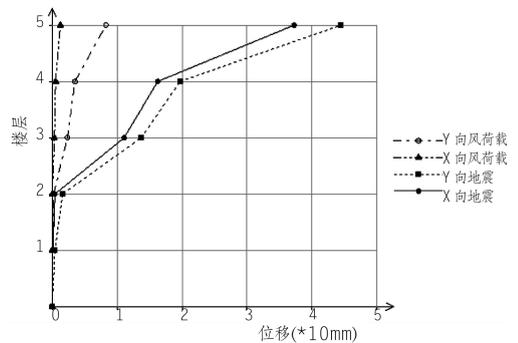


图12 主变开关楼楼层最大位移简图

3 结语

苏洼龙水电站主变开关楼,采用空间有限元
(下转第58页)

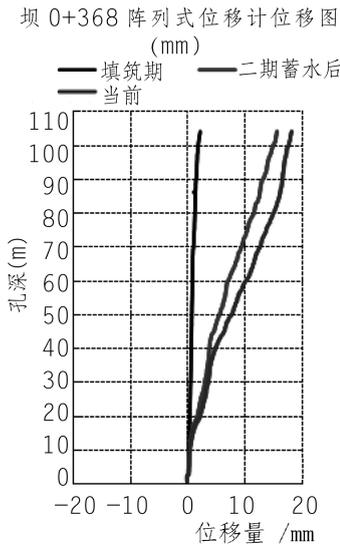


图4 心墙阵列式位移计(坝0+268m)监测成果图

较大局限性,监测沥青混凝土心墙与周边细过渡料常规手段大多是检测竖直向的变形,其水平向位移确实无法观测,而沥青混凝土心墙阵列式位移计较好地解决了水平向位移的检测难题。目前,在国内应用不多,主要原因是阵列式位移计在堆石坝填筑过程中受土建施工干扰极大,且必须与心墙

(上接第54页)

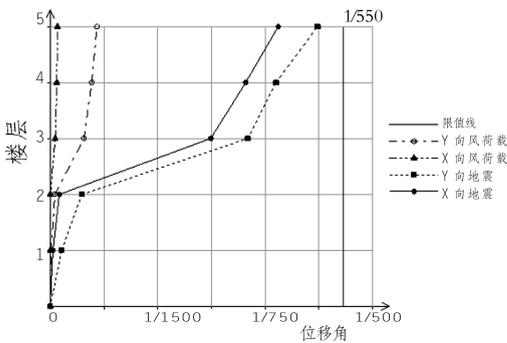


图13 结构最大层间位移角简图

分析软件 SETWE 研究强震区大跨度高框架建筑物结构设计。通过深入分析建筑物不利因素,合理优化结构体系,采用抗震墙—框架结构体系,保证了结构抗震的整体协调性。设计中,设置两道防震缝,给予主变开关楼框架结构主动分缝,改善结构抗震条件。同时,细化梁柱节点设计,平衡结构应力分布,满足节点关键区承载力要求。

通过平衡结构平面及竖向刚度,避免出现刚度突变及薄弱层,有效抑制结构扭转效应,保证了结构在地震荷载作用下的受力合理性。

周边填筑料一同牵引,经过苏洼龙水电站的实践证明,上述阵列式位移计埋设方法不仅保证与大坝填筑进度相结合,且极大减少了土建施工对现场长置仪器的破坏,确保阵列式位移计成功安装,并取得填筑期与蓄水期较为丰富的观测成果。

参考文献:

[1] 张玉龙,张绍春,李仕胜,等. 固定测斜仪在面板堆石坝中的应用实例[J]. 云南水力发电,2012,28(4):23-26.
 [2] 沈嗣元,马能武,葛培清,等. 超高心墙堆石坝安全监测工程的创新技术探讨[J]. 人民长江,2010,41(20):5-11.
 [3] 杨泽艳,周建平,王富强,等. 300 m 级高面板堆石坝安全性及关键技术研究综述[J]. 水力发电,2016,42(9):41-63.
 [4] 王佃明. 滑坡监测仪器野外安装与保护方法[J]. 岩土钻掘工程,2013. 40(7):21-28.
 [5] 韦玉超, SAA 测量技术及其在边坡监测中的应用研究[D]. 南京大学硕士学位论文,2015. 5.

作者简介:

唐茂刚(1974-),男,四川成都人,高级工程师,主要从事水利水电工程建设管理工作;
 董 阳(1976-),男,云南大理人,助理工程师,主要从事水电站工程安全监测研究及项目管理工作;
 王麒麟(1992-),男,云南丽江人,技术员,主要从事水电站工程安全监测工作。

(责任编辑:卓政昌)

苏洼龙水电站主变开关楼通过结构抗震构造设计的深入研究,满足了建筑物强震下楼层侧向剪切刚度、楼层剪重比、层间位移角等要求,保证了结构在地震状况的协调性和稳定性。

参考文献:

[1] 张启灵,伍鹤皋,李端有. 水电站地面厂房抗震措施研究[J]. 水力发电学报,2012,31(5):184-190.
 [2] 赵景. 水电站厂房抗震性能的设计与加固[J]. 黑龙江科技信息,2017,(5):236.
 [3] 井向阳,石太军,撒文奇,等. 大跨度高排架抗震措施研究[J]. 人民长江,2015,45(2):92-95.
 [4] 赵桂连,张清琼,唐碧华. 大型复杂启闭机排架结构的优化设计[J]. 水电站设计,2014,30(2):82-86.
 [5] 水工建筑物抗震设计标准[S]. GB51247-2018.
 [6] 建筑抗震设计规范(2016年版)[S]. GB50011-2010.
 [7] 高层建筑混凝土结构技术规程[S]. JGJ3-2010.

作者简介:

胡 冰(1990-),男,山东聊城人,工程师,硕士,从事水工结构设计;
 谭盛凛(1987-),男,江西九江人,高级工程师,硕士,从事水工结构设计;
 阳运生(1963-),男,广西桂林人,正高级工程师,学士,从事水工结构设计。

(责任编辑:卓政昌)