

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2009.05.018

水电站厂房钢管混凝土排架结构抗震性能

程 恒 张燎军 林 斌 阎建维

(河海大学水利水电工程学院,江苏 南京 210098)

摘要:根据某水电站厂房钢管混凝土排架结构的受力特点和变形规律,建立了上部厂房组合结构的整体三维动力有限元分析模型,分析了钢管混凝土排架结构的动力特性,给出了排架结构的自振频率.采用 Newmark 分析方法研究了钢管混凝土排架结构地震响应,给出了水平地震作用下排架结构的应力和位移的变化规律,并对排架柱的抗震性能进行了评价.

关键词:水电站厂房;钢管混凝土;排架柱;抗震性能;地震反应;时程分析

中图分类号:TV312 文献标识码:A 文章编号:1000-1980(2009)05-0586-05

钢管混凝土是指在钢管中填充混凝土后形成的构件.由于钢管对混凝土的约束作用,混凝土由单向受力状态转化为三向受力状态,使混凝土的强度得以提高,塑性和韧性性能大为改善^[1].另外,钢管混凝土排架柱具有良好的抗震性能^[2-4],它与钢筋混凝土排架柱相比,柱截面可减小,从而减小了自重,降低了地震反应.

目前,钢管混凝土的研究主要集中于基本构件和连接结点方面,且静力多于动力,圆钢管混凝土多于矩形钢管混凝土.1991 年 Matsuani 等^[5]用 KOSMOS 有限元程序对钢管混凝土结构体系进行了三维弹塑性地震反应分析;1997 年 Hajjar 等^[6-9]提出了 2 种用于方形和矩形钢管混凝土结构和构件动力计算的杆系模型;2002 年李向真等^[10]应用三段变刚度模型对一钢管混凝土结构的实际工程进行了弹塑性时程分析.但对钢管混凝土组合结构构建的厂房的动力反应研究成果较少.本文针对某水电站厂房钢管混凝土排架结构,采用大型有限元软件 ANSYS 对其进行动力特性及抗震分析研究,给出了水平地震作用下结构最不利位置处的应力和位移时程曲线.

1 动力分析方法

在地震作用下,结构运动方程是

$$M\ddot{U} + C\dot{U} + KU = MG(t) \tag{1}$$

式中: M ——系统质量矩阵; C ——系统阻尼矩阵; K ——系统刚度矩阵; $G(t)$ ——地面加速度列阵; $U, \dot{U}, \ddot{U}$ ——节点的位移、速度及加速度列阵.

式(1)采用 Newmark 时间积分法求解^[11].时程分析时用完整系统矩阵法(Full 法)计算结构的时程响应.Full 法操作简单,计算精度高,但在阻尼处理时会忽略恒定阻尼比和振型阻尼.因此,本文采用 Rayleigh 阻尼来表征系统的总阻尼矩阵,即假定

$$C = \alpha M + \beta K \tag{2}$$

其中^[12]

$$\alpha = \frac{2\omega_i\omega_j(\zeta_i\omega_j - \zeta_j\omega_i)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)} \quad \beta = \frac{2(\zeta_i\omega_j - \zeta_j\omega_i)}{(\omega_j^2 - \omega_i^2)}$$

式中: ζ_i, ζ_j ——第 i, j 阶振型的阻尼比; ω_i, ω_j ——第 i, j 阶振型的频率.

该水电站抗震设防烈度为 8 度,场地特征周期为 $T_g = 0.2\text{ s}$, $\beta_{\max} = 2.25$,水平向设计地震加速度代表值为 0.246 g ,阻尼比为 0.05.本文按照水工抗震规范所采用的抗震设计标准反应谱^[13],选择地震波持续时间为 20 s,人工拟合生成一条地震加速度时程曲线对结构进行地震响应分析.

收稿日期:2008-09-16
作者简介:程恒(1982—),男,河南开封人,博士研究生,主要从事水工结构抗震分析研究.

2 计算模型和材料参数

2.1 计算模型

选取该水电站厂房 1 号机组段(图 1),采用大型有限元软件 ANSYS 分析研究.初步设计该厂房 1 号机组段平面尺寸为 $32\text{ m} \times 32.23\text{ m}$.排架柱上柱高为 10.15 m ,下柱高为 9.85 m ,排架柱间距为 8.30 m ,横截面如图 2 所示.图中尺寸:上柱 $b \times h = 1\,300\text{ mm} \times 1\,000\text{ mm}$, $t = 28\text{ mm}$, $t_w = 14\text{ mm}$, $h_0 = 944\text{ mm}$;下柱 $b \times h = 1\,300\text{ mm} \times 2\,600\text{ mm}$, $t = 28\text{ mm}$, $t_w = 14\text{ mm}$, $h_0 = 2\,544\text{ mm}$.厂房屋顶计算时采用拱形屋面,中心角弧度为 43° ;吊车梁为箱形钢结构,高 $2\,150\text{ mm}$,宽 890 mm ,腹板厚 14 mm ,翼缘板厚 26 mm .联系梁采用工字钢 63c.

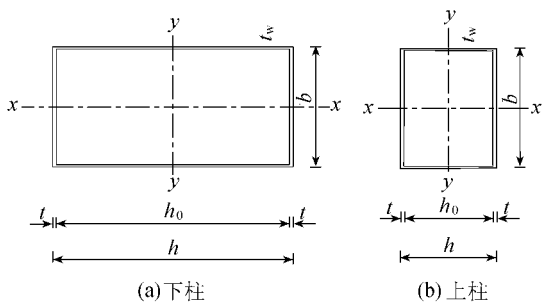


图 2 排架柱横截面

Fig. 2 Cross section of bent column

钢管与混凝土间认为是有效黏结,不发生滑动和脱开.排架柱间的水平联系梁采用三维梁单元,可以模拟梁的实际截面形状、尺寸和受力特点;屋架支承拱形梁采用三维梁单元模拟,压型钢板根据其构造形式采用三维壳体单元模拟;吊车梁腹板、翼缘根据各钢板的构造尺寸、厚度采用三维壳体单元模拟.上述计算模型能够较为真实的模拟上部厂房组合结构的相互作用.厂房 1 号机组段三维计算模型共剖分节点 $84\,896$ 个,单元 $95\,390$ 个.坐标系厂房横向为 x 轴,纵向为 y 轴,竖向为 z 轴.排架柱柱底为固定约束.三维有限元网格如图 3 所示.

2.2 材料参数

钢管内填 C40 混凝土,弹性模量为 32.5 GPa ,密度为 $2\,500\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.167 .抗拉强度为 1.71 MPa ,抗压强度为 19.5 MPa .外围钢管采用 Q345B 钢材,弹性模量为 206 GPa ,密度为 $7\,800\text{ kg/m}^3$,泊松比为 0.3 .为了反映动荷载作用时材料弹性模量增大现象,根据 DL5073—2000《水工建筑物抗震设计规范》^[13]要求,混凝土和钢材的动态强度和动态弹性模量的标准值可较静态标准值提高 30% ,混凝土动态抗拉强度的标准值可取为动态抗压强度标准值的 8% .

3 钢管混凝土排架结构动力特性和地震响应分析

由于钢管混凝土排架结构的稳定性对于整个上部厂房组合结构的稳定性起决定作用,故本文主要研究钢管混凝土排架结构在地震荷载作用下的抗震性能.

3.1 动力特性

根据设计部门提供的方案,自振特性计算时考虑吊车为空载的情况.自振特性计算表明,厂房的轻型压型钢板屋面较易激起振动,因此为了研究排架柱的自振特性,计算时过滤了屋面、联系梁引起的前几阶激起屋面和联系梁振动的振型.为了保证精度,取 15 阶振型进行计算.计算结果表明,排架柱系统的基频为 $4.611\,3\text{ Hz}$,第二阶频率为 $4.627\,0\text{ Hz}$,第三阶频率为 $4.940\,6\text{ Hz}$.第一阶振型以排架柱 y 向振动为主,第二阶振

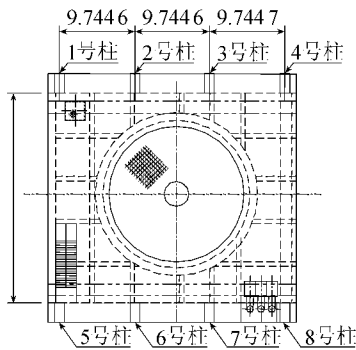


图 1 厂房 1 号机组段平面

Fig. 1 Plan of 1# hydro-generator unit

针对厂房 1 号机组段钢管混凝土排架柱、吊车梁、屋顶的工作特点和受力方式,建立了钢管混凝土排架柱和吊车梁联合作用的三维组合有限元模型.其中吊车梁上缘与排架柱上柱通过钢板连接,以保证吊车梁稳定性.整个模型采用映射网格划分,以保证计算精度.整个模型根据不同构件的实际断面形式、几何形状、受力特点采用了不同的单元类型进行模拟:对排架柱的内填混凝土采用等参六面体单元模拟,排架柱外包钢管采用三维壳体单元模拟,

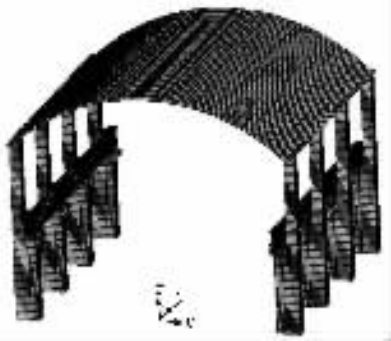


图 3 厂房 1 号机组段排架柱三维有限元网格

Fig. 3 3D finite element mesh of bent column of 1# hydro-generator unit

型以排架柱 x 向振动为主.随后的几阶振型有的以排架柱 y 向振动、竖向振动为主,有的以吊车梁振动、屋面振动为主.振型叠加法结果显示,10 阶以后的振型对地震反应的贡献已经很小,可以忽略不计.表 1 给出了前 15 阶自振频率.

表 1 钢管混凝土排架柱的自振频率
Table 1 Natural frequencies of concrete-filled steel tube bent columns

阶数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
频率/Hz	4.6113	4.6270	4.9406	5.0887	5.2266	5.4951	5.8022	7.6008	8.0717	8.5357	13.604	13.977	14.500	14.521	14.798

3.2 地震响应分析

3.2.1 结构动位移

x 向地震: x 向地震时,钢管混凝土排架柱结构以 x 向的动位移为主,最大值出现在地震时间 4.66 s,为 9.08 mm,位于 3 号排架柱(图 1)柱顶. y 向动位移很小,不起控制作用.竖向最大动位移位于 3 号排架柱柱顶,为 0.67 mm.图 4 给出了 x 向地震作用下 3 号排架柱柱顶的 x 向动位移时程曲线.

y 向地震: y 向地震时,钢管混凝土排架柱结构以 y 向的动位移为主,最大值出现在地震时间 9.82 s,为 8.73 mm,位于 4 号排架柱(图 1)柱顶.由于钢管混凝土排架柱 y 向截面为变截面, y 向地震时将产生一定的 x 向动位移,为 3.17 mm,位于 4 号排架柱柱顶.竖向最大动位移位于 4 号排架柱柱顶,为 0.66 mm.图 5 给出了 y 向地震作用下 4 号排架柱柱顶的 y 向动位移时程曲线.

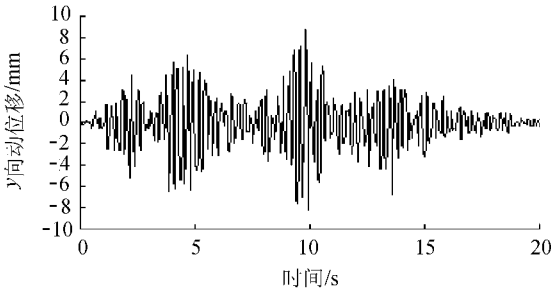
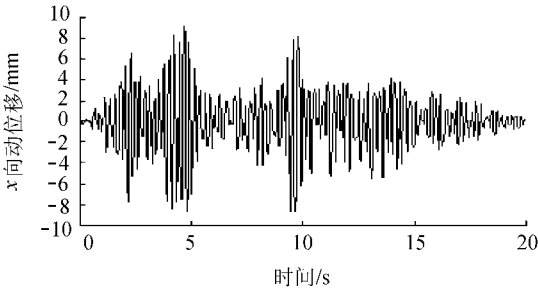


图 4 x 向地震 3 号排架柱柱顶 x 向动位移时程曲线

图 5 y 向地震 4 号排架柱柱顶 y 向动位移时程曲线

Fig. 4 Time-history curves of dynamic displacement on

Fig. 5 Time-history curves of dynamic displacement on

3# bent column top in x direction under x -direction earthquake 4# bent column top in y direction under y -direction earthquake

上述结果表明: x 向地震和 y 向地震时,最大动位移均出现在排架柱柱顶, x 向地震时的动位移较 y 向地震时的动位移大.

3.2.2 结构的动应力

x 向地震: x 向地震时,最大动应力以竖向应力为主.上柱底面动应力较下柱底面动应力大.最大竖向动拉应力出现在地震时间 9.66 s,钢管应力为 15.25 MPa,混凝土应力为 2.23 MPa,位于 4 号排架柱上柱柱底厂房内侧角点.最大竖向动压应力出现在地震时间 4.66 s,钢管应力为 16.23 MPa,混凝土应力为 2.37 MPa,位于 4 号排架柱上柱柱底厂房内侧角点.图 6 分别给出了 x 向地震时 4 号排架柱上柱柱底钢管、混凝土竖向动应力时程曲线.

y 向地震: y 向地震时,与 x 向地震动应力分布规律不同,下柱底面动应力最大.最大竖向动拉应力出现在地震时间 9.7 s,钢管应力为 17.17 MPa,混凝土应力为 3.04 MPa,位于 4 号排架柱下柱柱底厂房内侧角点,为应力集中.最大竖向动压应力出现在地震时间 9.82 s,钢管应力为 20.80 MPa,混凝土应力为 3.05 MPa,位于 4 号排架柱下柱柱底厂房内侧角点.图 7 分别给出了 y 向地震时 4 号排架柱下柱柱底钢管、混凝土竖向动应力时程曲线.

上述结果表明:地震最大动应力以竖向应力为主. x 向地震时,最大动应力出现在排架柱上柱柱底; y 向地震时,最大动应力出现在排架柱下柱柱底.地震荷载作用下,排架柱的上柱和下柱柱底角点处混凝土由于出现应力集中现象,拉应力会超出允许应力,但影响范围很小.由于排架柱外包钢管的应力值均远小于钢材允许应力,整个钢管混凝土排架结构强度和刚度都能满足设计要求.

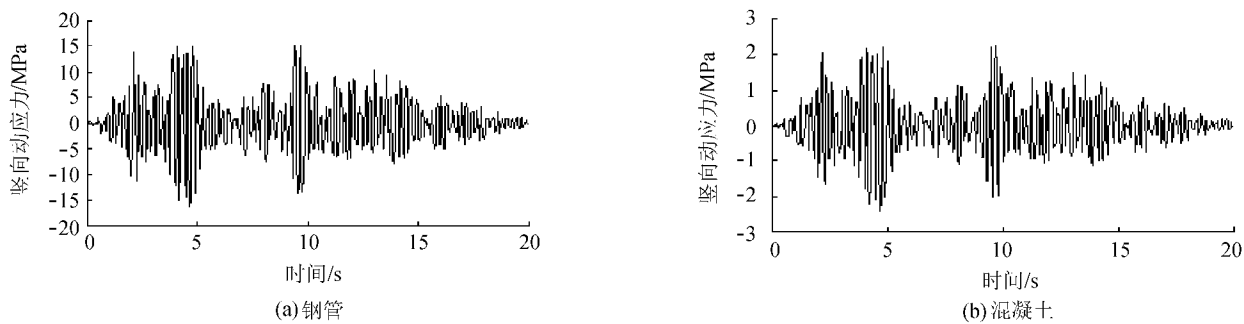


图 6 x 向地震时 4 号排架柱上柱柱底动应力时程曲线

Fig. 6 Time-history curves of vertical dynamic stress at upper column bottom of 4# bent column under x-direction earthquake

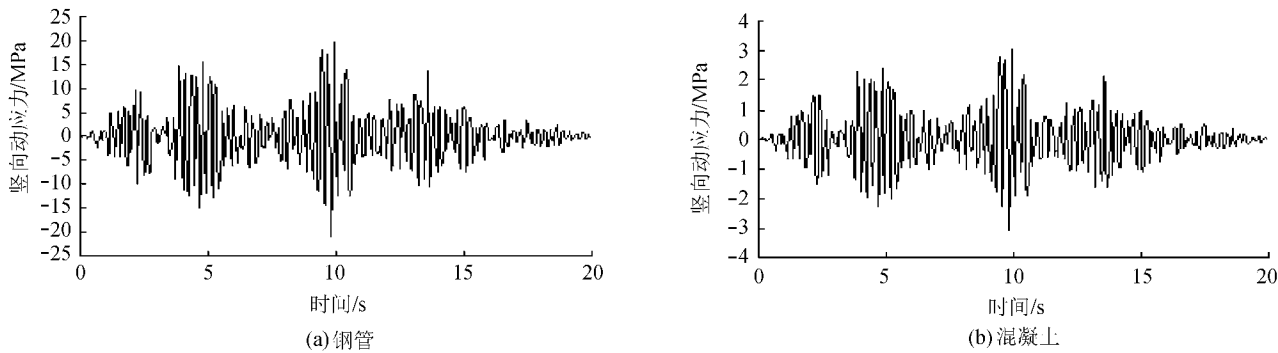


图 7 y 向地震时 4 号排架柱下柱柱底动应力时程曲线

Fig. 7 Time-history curves of vertical dynamic stress at lower column bottom of 4# bent column under y-direction earthquake

4 结 语

本文根据钢管混凝土组合结构的受力特点和变形规律建立了三维组合结构抗震分析有限元模型,采用时程分析法计算了某水电站厂房钢管混凝土排架结构的动力特性和地震动力响应.计算分析表明,在地震荷载作用下,排架柱上柱柱底和下柱柱底角点附近有应力集中现象,应力值较大,其他部位应力均较小,应力分布符合一般规律,成果满足设计要求.

参考文献：

[1] 卢羽平,张燎军,冉懋鹄.洪家渡水电站厂房矩形钢管混凝土叠合柱抗震分析[J].华北水利水电学院学报,2005,26(1):35-38.(LU Yu-ping,ZHANG Liao-jun,RAN Mao-ge. Aseismatic analysis of rectangular concrete filled steel tube composite column of Hongjiadu hydropower station powerhouse[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power,2005,26(1):35-38.(in Chinese))

[2] 杨有福.矩形钢管混凝土构件力学性能的若干关键问题研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2003.

[3] 黄襄云,周福霖,徐忠根.钢管混凝土结构抗震性能的比较研究[J].世界地震工程,2001,17(2):86-89.(HUANG Xiang-yun,ZHOU Fu-lin,XU Zhong-gen. Comparative study on the earthquake behavior of concrete filled steel tubular structures[J]. World Information on Earthquake Engineering,2001,17(2):86-89.(in Chinese))

[4] NAKANISHI K,KITADA T,NAKAI H. Experimental study on ultimate strength and ductility of concrete filled steel columns under strong earthquake[J]. Journal of Constructional Steel Research,1998,51:297-319.

[5] 杨有福,韩林海,范喜哲.钢管混凝土动力性能研究现状[J].哈尔滨建筑大学学报,2000,33(5):40-45.(YANG You-fu,HAN Lin-hai,FAN Xi-zhe. Present situation of research on dynamic behavior of concrete filled steel tubes[J]. Journal of Harbin University of C E & Architecture,2000,33(5):40-45.(in Chinese))

[6] HAIJJAR J F,MOLODAN A,SCHILLER P H. A distributed plasticity model for cyclic analysis of concrete-filled steel tube beam-columns and composite frames[J]. Journal of Steel Construction and Research,1997,20(5):398-411.

[7] SCHILLER P H,HAIJJAR J F,MOLODAN A. Nonlinear analysis of composite concrete-filled steel tube frames[C]//International

Conference Report on Composite Construction-Conventional and Innovative. Innsbruck IABSE ,1997 283-288.

- [8] HAIJJAR J F ,GOURLEY B C. A cyclic nonlinear model for concrete-filled tube[J]. Journal of Structural Engineering ,ASCE ,1997 ,123 (6) :736-744.
- [9] HAIJJAR J F. A distributed plasticity model for concrete-filled steel tube beam-columns with interlayer slip[J]. Engineering Structures , 1998 ,20(8) :663-676.
- [10] 李向真 ,程国亮 ,于德介 ,等 . 钢管混凝土结构的弹塑性时程分析[J]. 世界地震工程 ,2002 ,18(1) :73-76.(LI Xiang-zhen , CHENG Guo-liang ,YU De-jie et al. Elasto-plastic time-history analysis of concrete filled steel tubular structure[J]. World Information on Earthquake Engineering ,2002 ,18(1) :73-76.(in Chinese))
- [11] 王广军 . 地震作用[M]. 北京 :地震出版社 ,1991.
- [12] 赵光恒 . 结构动力学[M]. 北京 :中国水利水电出版社 ,1995.
- [13] DL5073—2000 水工建筑物抗震设计规范[S].

Seismic behavior of concrete-filled steel tube bent structure of hydropower stations

CHENG Heng , ZHANG Liao-jun , LIN Bin , YAN Jian-wei

(College of Water Conservancy and Hydropower Engineering , Hohai University , Nanjing 210098 , China)

Abstract : With regard to the stress characteristics and deformation rules of concrete filled steel tube bent structure of a hydropower station , a 3D dynamic finite element model of steel-concrete composite structure for upper workshop was established. The dynamic characteristic of the concrete-filled steel tube bent structure was analyzed , and its natural vibration frequency was given. The Newmark analysis method was employed to study the seismic response of the bent structure , and change of the stress and displacement of bent structure was also yielded. The seismic behavior of the bent structure was evaluated.

Key words : hydropower station ;concrete-filled steel tube ;bent column ;seismic behavior ;seismic response ;time-history analysis