

罗力谦, 张移, 朱嘉健, 等. 乐昌峡大坝地震响应分析[J]. 华南地震, 2021, 41(3): 55–62. [LUO Liqian, ZHANG Yi, ZHU Jiajian, et al. Seismic Response Analysis of Lechangxia Dam[J]. South China journal of seismology, 2021, 41(3): 55–62]

乐昌峡大坝地震响应分析

罗力谦¹, 张移^{2,3,4}, 朱嘉健^{2,3,4}, 姜慧^{3,4,5}, 王立新^{3,4,5}, 吴华灯^{2,3,4}, 朱信华⁵

(1. 广东粤海飞来峡水力发电有限公司, 广东 清远 511500; 2. 广东省地震局, 广州 510070; 3. 中国地震局地震监测与减灾技术重点实验室, 广州 510070; 4. 广东省地震预警与重大工程安全诊断重点实验室, 广州 510070; 5. 深圳防灾减灾技术研究院, 深圳 51800; 6. 广东粤海飞来峡水力发电有限公司乐昌峡分公司, 韶关 512000)

摘要: 乐昌峡大坝位于广东省韶关市乐昌市境内, 建造时按照Ⅴ度区进行抗震设计, 随着2016年第五代地震动参数区划图的实施, 该区设防烈度提高为Ⅵ度, 大坝在Ⅵ度地震影响下是否安全需要进行分析。利用图纸资料建立了大坝的三维有限元模型, 计算分析了多水位下特征坝段的频率和大坝的地震响应, 结果表明: 溢流坝段的频率小于两岸挡水坝段。地震作用下, 大坝位移最大值出现在坝顶处, 应力最大处出现在闸墩、牛腿及坝踵处, 但均处于安全范围, 证明大坝抗震性能良好; 库水水位会显著影响大坝的频率及地震响应, 在抗震设计时, 应引起注意。

关键词: 乐昌峡大坝; 粘弹性人工边界; 自振频率; 地震响应

中图分类号: TB123; TV32

文献标识码: A

文章编号: 1001-8662(2021)03-0055-08

DOI: 10.13512/j.hndz.2021.03.08

Seismic Rspnse Analysis of Lechangxia Dam

LUO Liqian¹, ZHANG Yi^{2,3,4}, ZHU Jiajian^{2,3,4}, JIANG Hui^{3,4,5},
WANG Lixin^{3,4,5}, WU Huadeng^{2,3,4}, ZHU Xinhua⁵

(1. Guangdong Yuehai Feilaixia Hydropower Generation Co., Ltd., Qingyuan 511500, China; 2. Guangdong Earthquake Agency, Guangzhou 510070, China; 3. CEA Key Laboratory of Earthquake Monitoring and Disaster Mitigation Technology, Guangzhou 510070, China; 4. Guangdong Provincial Key Laboratory of Earthquake Early Warning and Safety Diagnosis of Major Projects, Guangzhou 510070, China; 5. Shenzhen Academy of Disaster Prevention and Reduction, Shenzhen 518003, China; 6. Guangdong Yuehai Feilaixia Hydropower Generation Co., Ltd. Lechangxia Branch, Shaoguan 512000, China)

Abstract: The Lechangxia Dam is located in Lechang City, Shaoguan City, Guangdong Province., and was constructed according to the seismic design of the V degree zone. With the implementation of the fifth-generation ground motion parameter zoning map in 2016, the fortification intensity of this area has been increased to VI degree and whether the dam is safe under the influence of VI degree earthquake needs to be analyzed. By using the drawing data, the article establishes a three-dimensional finite element model of the dam, calculates and analyzes

收稿日期: 2021-03-10

基金项目: 广东省科技计划项目(2018B020207011); 广东省科技计划项目(2017B030314082); 广东省科技计划项目(2018B020208003)

作者简介: 罗力谦(1974-), 男, 本科, 工程师, 主要从事水工结构抗震研究。

通信作者: 张移(1991-), 男, 硕士, 助理工程师, 主要从事结构抗震与结构健康监测研究。

E-mail: movezhangsx@163.com

the frequency of the characteristic dam section under multiple water levels and the seismic response of the dam. The results show that the frequency of the overflow dam section is less than that of the retaining dam sections on both banks. Under earthquake, the maximum displacement of the dam appears at the top of the dam, and the maximum stress appears at the piers, corbels and heels of the dam, but they are all in a safe range, which proves that the dam has good seismic performance. The reservoir water level will significantly affect the frequency and seismic response of the dam, which should be paid attention to during seismic design.

Keywords: Lechangxia Dam; Viscoelastic artificial boundary; Natural vibration frequency; Earthquake response

0 引言

重力坝作为一种施工工艺成熟的坝型,因其适宜在各种地形条件下建造,因此在我国分布广泛。而我国地处两大地震带之间,地震活动频繁,地震可能会对坝体造成损伤。例如,1962年广东新丰江大坝因地震产生了82 m的贯穿性裂缝^[1],1967年印度 Konya 大坝上游坝面与下游坝面都在地震作用下产生了水平向裂缝,1971年美国 Pacoima 大坝因附近的断层地震使左侧坝肩部位发生破坏^[2]。一旦

因地震而造成溃坝,对下游造成的灾害将是难以估计的,应重视重力坝的抗震安全性问题。

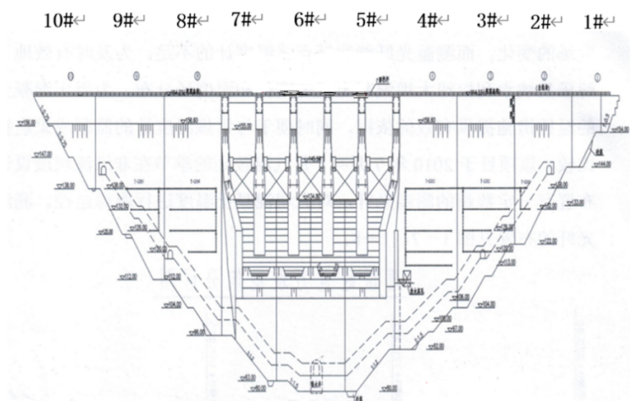
乐昌峡水利枢纽是一座以防洪为主,兼具发电、航运与灌溉功能的水电站,位于广东省乐昌市乐昌峡附近,距离乐昌市市区为14 km。

乐昌峡水利枢纽的拦河大坝为碾压混凝土重力坝,最大高程为164.2 m,大坝高度为84.2 m,沿坝轴向长度为256 m,坝顶宽度为7 m,共10个坝段,中间三个溢流坝段,左岸4个挡水坝段,右岸3个挡水坝段(图1)。

乐昌峡大坝主体工程于2009年开始施工,在



(a)乐昌峡大坝下游视图



(b)坝段布置图

图1 乐昌峡大坝视图

Fig.1 The view of Lechangxia Dam

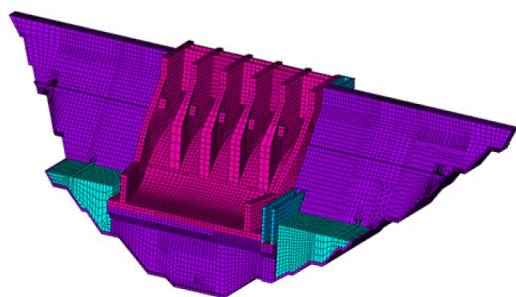
设计初期,大坝所处场址为Ⅴ度区,随着我国经济的快速增长,对建构物的抗震安全性要求也逐步提高,2016年实施的《中国地震动参数区划图》(GB 18306-2015),该区设防烈度提高为Ⅵ度^[3],在Ⅵ度区的地震作用,大坝的安全性如何,需要进行计算分析。

本文利用图纸资料建立了乐昌峡大坝的有限元模型,首先进行了三个特征坝段的频率计算,分析了水位对大坝的影响,然后对大坝在四种特征水位下的地震响应进行了计算,分析了大坝在Ⅵ度区的地震作用下的抗震安全性。

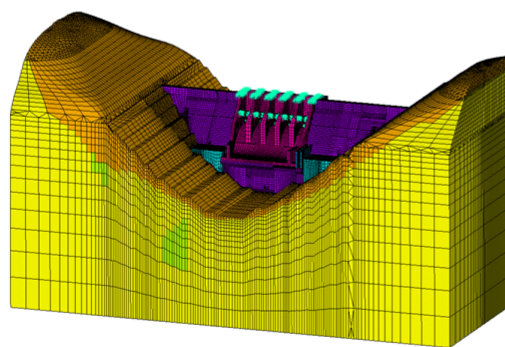
1 有限元模型

1.1 模型建立

采用ANSYS有限元分析软件,建立乐昌峡大坝坝体-地基系统的三维有限元模型(图2),模型几何参数与材料参数均来自于实际施工的图纸资料,坝体混凝土材料(表1)及地基(表2)采用Solid45实体单元,坝顶及溢流坝段处的闸门等机械设备采用mass21质点单元。坝体各坝段之间存在着横缝,采用接触单元Contact173及目标单元Target170对坝体横缝进行模拟,以有效模拟横缝非线性张合问题。此外,摩擦模型采用库伦模型,接触算法选用扩展拉格朗日算法。



(a) 坝体模型



(b) 坝体-地基系统模型

图2 乐昌峡大坝有限元模型

Fig.2 FEM model of Lechangxia Dam

表1 坝体材料参数

Table 1 Material parameters of the dam

混凝土强度等级	材料位置	弹模 /GPa	泊松比	容重 /(kN·m ⁻³)
C15	坝顶、坝体背水面、基础垫层	22.0	0.167	24
C10	坝体内部	17.5	0.167	24
C20	坝体迎水面、廊道	25.5	0.167	24
C30	溢流坝坝面、导墙	30.0	0.167	24

表2 地基材料参数

Table 2 Material parameters of the subsoil

风化程度	基岩种类	弹性模量 /GPa	泊松比	容重 /(kN·m ⁻³)
弱风化	石英砂岩	76.7	0.21	26.78
	板岩	68.4	0.15	27.47
微风化	粉砂岩	76.2	0.22	26.98
	石英砂岩	83.6	0.21	26.78

注:根据《水工混凝土结构设计规范》SL191-2008^[4],碾压混凝土弹性模量取普通混凝土弹性模量的1.02倍。

1.2 边界条件及荷载

地基的边界条件采用粘弹性人工边界,可以很好的解决地基辐射阻尼问题。它的原理是在地基边界节点处施加阻尼器与弹簧单元来吸收外行波的能量和模拟地基的恢复力,在ANSYS中可以采用combine14单元来模拟实现,其弹簧阻尼器参数可以用以下公式计算得到:

$$K_{BN} = \alpha_N \frac{G}{R}, C_{BN} = \rho C_p \quad (1)$$

$$K_{BT} = \alpha_T \frac{G}{R}, C_{BT} = \rho C_s \quad (2)$$

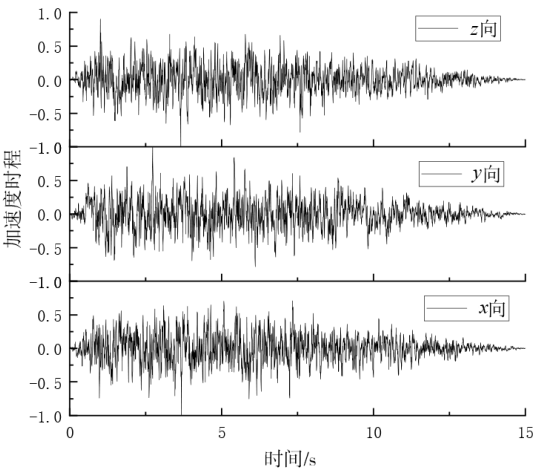
式中: K_{BN} 与 C_{BN} 分别为法向的弹簧刚度与阻尼器系数, K_{BT} 与 C_{BT} 分别为切向的弹簧刚度与阻尼器系数, G 为剪切模量, R 为波源与边界的距离, C 为介质波速, α_N 与 α_T 为法向与切向的修正系数,本研究中取 $\alpha_N=4.0$, $\alpha_T=2.0$ ^[5-6]。

地震作用下,坝体承受的荷载包括坝体自重、地震荷载、静水压力、动水压力以及扬压力。动水压力采用 Vestergaard 公式^[7]计算;

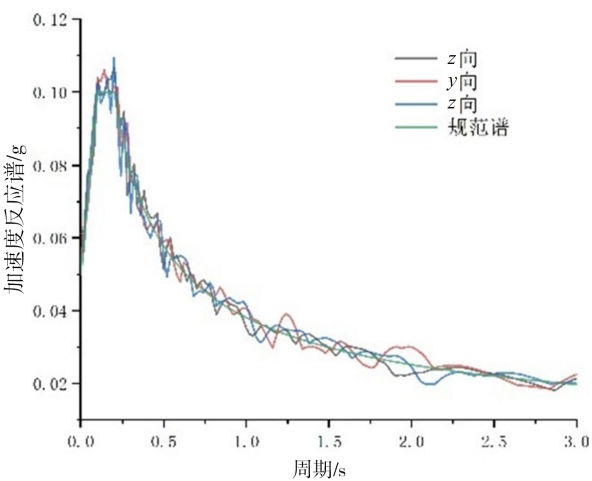
$$P_w = \frac{7}{8} a_h \rho_w \sqrt{Hh} \tag{3}$$

式中， P_w 为水深为 h 处的动水压力， a_h 为地震加速度， ρ_w 为库水的密度， H 为水库水的深度。在ANSYS软件中通过mass21质点单元实现。扬压力根据《水工建筑物荷载设计规范》DL5077-1997^[8]来计算。

大坝所处地区为抗震设防6度区，Ⅱ类场地，即基本加速度峰值为0.05 g，特征周期为0.2 s。根据《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB 35047-2015)^[7]中的规范谱使用三角级数法生成归一化的三向加速度时程及反应谱(图3)，反应谱控制误差在10%以内，其中 X 向为大坝轴向即横河向， Y 方向为顺河向， Z 方向为竖直



(a)加速度时程



(b)反应谱

图3 三向的加速度时程及反应谱
Fig.3 Acceleration time history and response spectrum
in three directions

2 动力计算

2.1 频率计算

大坝间由于切割缝的存在，各个坝段的运动相对独立，为评估大坝不同坝段的模态特性，计算左岸、右岸以及中间溢流段中坝高最高的坝段(4号、6号、8号坝段)不同水位下的频率(表3~5)。基于计算结果，绘制水位与频率的关系曲线(图4~6)。

表3 4号坝段不同水位模态频率 (Hz)

Table 3 Mode frequency of No.4 dam section at different water levels (Hz)

阶次	水位/m							
	141.5	144.0	147.1	150.0	154.4	156.0	159.0	163.0
1	5.68	5.68	5.68	5.67	5.50	5.40	5.17	4.85
2	6.05	5.98	5.86	5.75	5.68	5.68	5.68	5.68
3	7.60	7.57	7.54	7.50	7.45	7.43	7.40	7.34
4	8.05	8.04	8.03	8.02	8.01	8.00	7.97	7.86
5	8.67	8.67	8.65	8.64	8.61	8.60	8.55	8.43

表4 6号坝段不同水位自振频率 (Hz)

Table 4 Natural vibration frequency of No.6 dam section at different water levels (Hz)

阶次	水位/m							
	141.5	144.0	147.1	150.0	154.4	156.0	159.0	163.0
1	6.13	6.08	6.00	5.87	5.63	5.53	5.29	4.93
2	6.29	6.27	6.25	6.24	6.23	6.23	6.23	6.23
3	7.44	7.41	7.38	7.34	7.29	7.27	7.24	7.18
4	7.99	7.98	7.97	7.96	7.95	7.94	7.92	7.84
5	8.63	8.63	8.62	8.60	8.58	8.56	8.53	8.44

表5 8号坝段不同水位自振频率 (Hz)

Table 5 Natural vibration frequency of No.8 dam section at different water levels (Hz)

阶次	水位/m							
	141.5	144.0	147.1	150.0	154.4	156.0	159.0	163.0
1	3.82	3.78	3.69	3.62	3.42	3.34	3.19	2.94
2	4.75	4.71	4.65	4.58	4.36	4.26	4.07	3.72
3	5.64	5.52	5.32	5.13	4.84	4.76	4.62	4.47
4	5.67	5.64	5.64	5.63	5.62	5.61	5.57	5.34
5	6.90	6.77	6.50	6.25	5.86	5.75	5.60	5.58

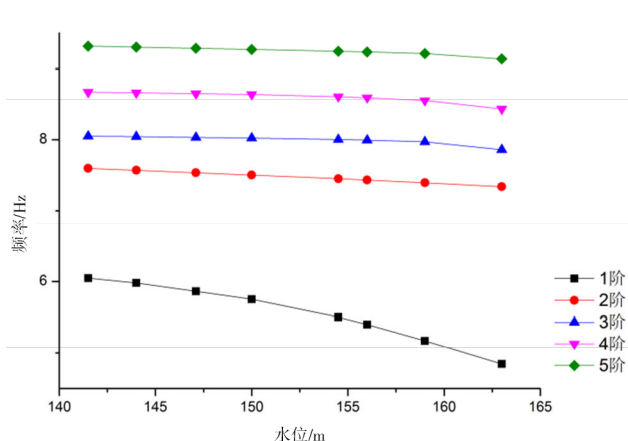


图4 4号坝段水位-自振频率关系曲线

Fig.4 Curve of relationship between water level and natural frequency of No. 4 dam section

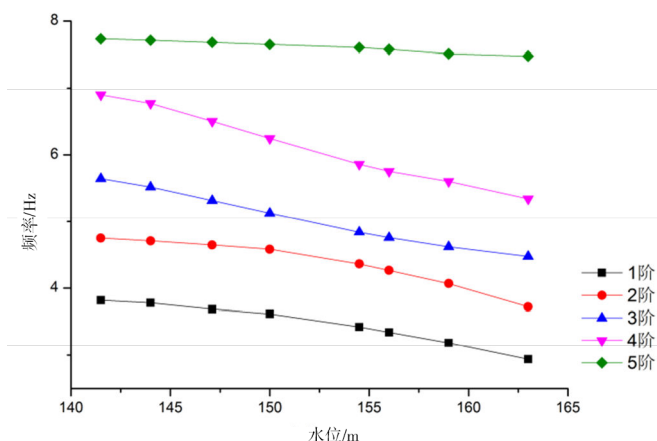


图5 6号坝段水位-自振频率关系曲线

Fig.5 Curve of relationship between water level and natural frequency of No. 6 dam section

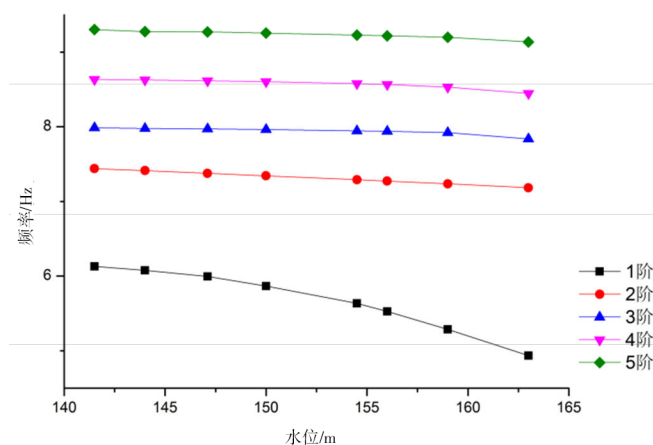


图6 8号坝段水位-自振频率关系曲线

Fig.6 Curve of relationship between water level and natural frequency of No. 8 dam section

各坝段上频率与水位的变化关系表明,各坝段的各阶自振频率均随水位的上升而下降。其中,当水位从140 m上涨到165 m时,4号坝段和8号坝段仅一阶频率变化最为明显,而6号坝段各阶频率均有较大变化。其中,4、6、8号坝段变化最大的

频率的变化幅度分别达到14.61%、23.04%和19.57%。

此外,图4~6的结果还显示,设定水位变化范围内,7 Hz以下的自振频率受水位变化影响更为显著。同时,观察各坝段的各阶频率值可知,4号

坝段与8号坝段由于结构形态与尺寸相似,频率较为接近,而6号溢流坝段由于上部闸墩、牛腿等相对较“柔”的构件的存在,整体频率较4号与8号坝段低。因此,造成了6号坝段多阶频率受水位变化影响更为显著的现象。

2.2 地震响应计算结果与分析

为分析不同水位下大坝的地震响应,设计了四种特征水位下计算工况(表6~7),地震动峰值加速度为0.05 g。

表 6 计算工况
Table 6 Calculation conditions

工况简称	主要荷载
动水 1	全部静力荷载(死水位)+动水压力+地震力
动水 2	全部静力荷载(正常蓄水位)+动水压力+地震力
动水 3	全部静力荷载(设计洪水位)+动水压力+地震力
动水 4	全部静力荷载(校核洪水位)+动水压力+地震力

表 7 特征水位值
Table 7 Characteristic water level value

特征水位	上游水位/m	下游水位/m
死水位	141.5	80.0
正常蓄水位	154.5	98.0
设计洪水位(P=1%)	162.2	107.9
校核洪水位(P=0.1%)	163.0	116.0

提取地震时程中顺河向位移与第一主应力结果最大值绘制云图(图7~8),并提取位移与应力最大位置数值(表8~9),由图和表可知:

(1)从顺河向位移结果分析可知,四种水位下,位移最大值均出现在中间溢流坝段坝顶处。同一高程下,两岸坝段的位移小于中间坝段,这是由于中间坝段的动水压力较大。此外,位移云图还表明,在同样的地震影响下,水位越高,大坝位移响应越大。

(2)从第一主应力结果分析可知,不同水位影响下,坝体的总体应力分布规律一致,应力较大值均出现在溢流坝段胸墙、挡水墙等结构形态突变处以及坝踵处。与位移分析结果类似,在同样地震作用下,水位越高,大坝应力响应越大。

(3)特别地,坝踵位置出现较大应力值,但其应力极值区域较小,且其应力值在较小范围内迅速变小。证明此处应是由于有限元计算方法中实体单元的的应力集中问题所致,不能反映结构真实应力状态。

(4)坝体实际施工时,在结构突变处配有钢筋,所以这些位置处的实际应力值远低于计算值。同时,考虑坝体其余区域均未超过该处混凝土的

抗拉强度,可以判断大坝在Ⅵ度区地震作用下仍处于弹性范围,抗震性能较好。

表 8 大坝顺河向位移极值位置及数值(mm)
Table 8 The loaction and value of the extreme displacement of the dam along the river (mm)

工况号	位置	数值
动水 1	6号坝段坝顶	3.82
动水 2	6号坝段坝顶	6.31
动水 3	6号坝段胸墙	9.76
动水 4	6号坝段坝顶	10.11

表 9 大坝第一主应力极值位置及数值(MPa)
Table 9 the extreme value of the first principal stress of the dam and its location (MPa)

工况号	位置	数值
动水 1	6号坝段挡水墙	2.17
动水 2	6号坝段胸墙	5.19
动水 3	6号坝段胸墙	6.43
动水 4	6号坝段胸墙	7.16

3 结语

本文基于有限元法和粘弹性人工边界对乐昌峡重力坝进行了多种水位下的3个坝段的模态频率计算与四种特征水位下的地震响应计算,结果表明:

(1)溢流坝段因为上部较“柔”构件的存在,刚度较小,频率小于两岸坝段。各个坝段的自振频率都随着水位的升高而降低,且在该大坝水位

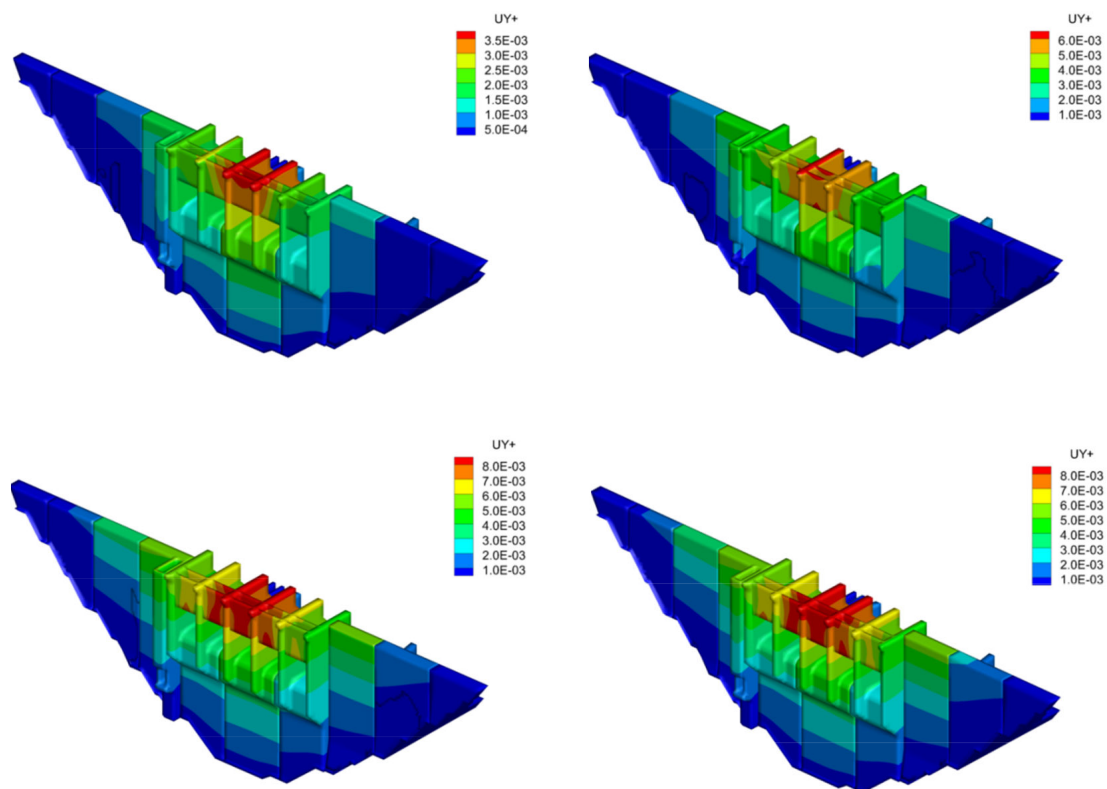


图7 顺河向位移云图

Fig.7 Displacement cloud map along the river

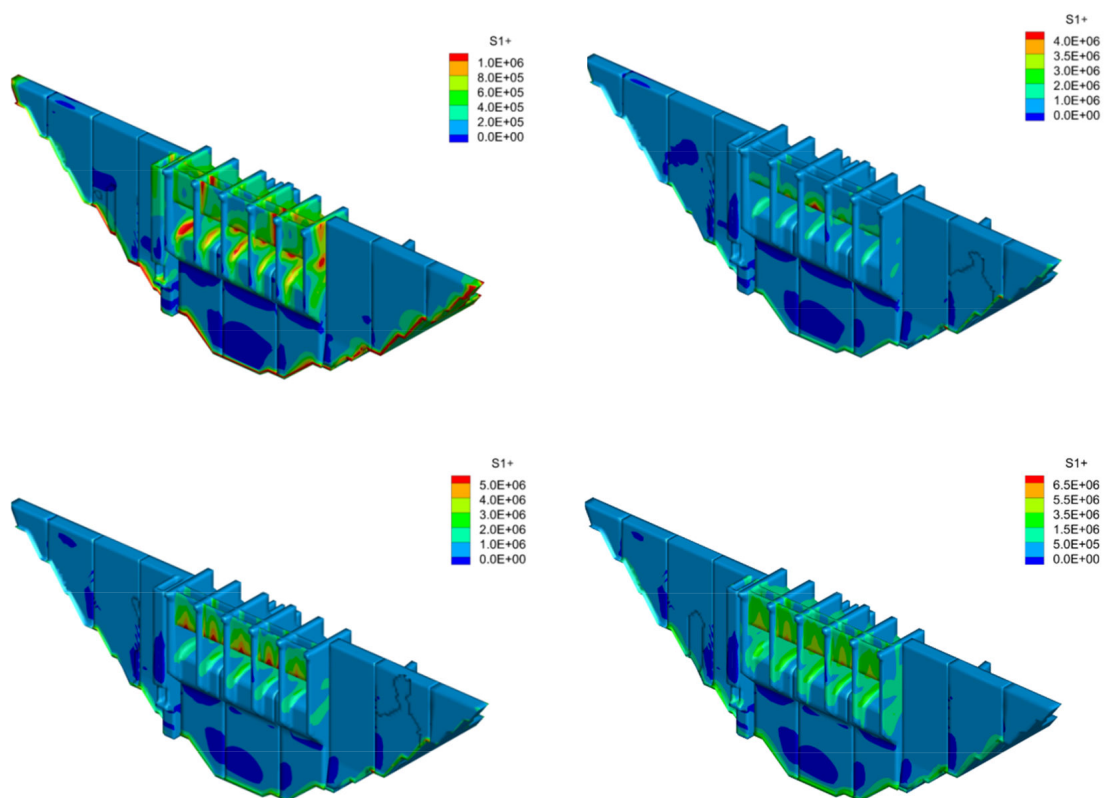


图8 第一主应力云图

Fig.8 First principal stress cloud

变化范围内,水位对7 Hz以下频率的影响更为显著。因此,在重力坝的安全监测时应注意水位的影响。

(2)四种水位下,大坝在设计地震作用下应力与位移分布呈现一定的规律性:坝体的位移从两岸坝段向中间坝段逐步增大,从坝底向坝顶逐步增大,位移极值出现在中间溢流坝段坝顶,水位的升高会增大坝体的位移。应力的极值会出现在闸墩牛腿等结构形态突变处与坝踵处,但各处的响应均在安全范围内。坝体应力也会随着水位的升高而增大,因此,高水位是对重力坝的地震安全性是一个不利因素,在重力坝的抗震设计时应引起重视。

参考文献

- [1] 宋晓春,姜慧,王立新,等.新丰江水库大坝强震动监测及其动力特性分析[J].华南地震,2016,36(04):34-41.
- [2] 陈厚群.混凝土高坝强震震例分析和启迪[J].水利学报,2009(01):10-18.
- [3] 中国国家标准化管理委员会.中国地震动参数区划图:GB 18306-2015[S].北京:地震出版社,2015.
- [4] 中华人民共和国水利部.水工混凝土结构设计规范:SL 191-2008[S].北京:中国水利水电出版社,2008.
- [5] 刘晶波,李彬.三维黏弹性静-动力统一人工边界[J].中国科学:技术科学,2005,35(9):966-980.
- [6] 李彬.地铁地下结构抗震理论分析与应用研究[D].北京:清华大学,2005.
- [7] 国家能源局.水电工程水工建筑物抗震设计规范:NB 35047-2015[S].北京:中国电力出版社,2015.
- [8] 中华人民共和国水利部.水工建筑物荷载设计规范:SL744-2016[S].北京:中国水利水电出版社,2016.