

DOI: 10.20040/j.cnki.1000-7709.2023.20221567

拱坝不同设计坝高方案的地震动响应比较研究

郭嘉晖¹, 李 静¹, 石 立^{1,2}, 徐 强¹, 陈坤强¹

(1. 大连理工大学建设工程学部, 辽宁 大连 116024; 2. 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司, 陕西 西安 710065)

摘要: 在同一坝址下进行水电枢纽建设, 挡水构筑物的高度是一个受众多因素影响的关键指标。从挡水大坝地震动响应变化的角度, 对某工程挡水构筑物三种设计坝高方案在静动力叠加工况下的响应进行了分析比较。结果表明, 随着坝体的增高, 拱坝的自重和库水压力不断增大, 但其地震动响应并非都随坝体的增高而增大, 算例中拱坝上游面梁向和拱向压应力随着坝体的增高而增大, 下游面梁向压应力随着坝体的增高而减小, 拱向压应力随坝体的增高呈先减后增的趋势, 正向位移和开度则随着坝体的增高呈先增后减的趋势。该研究结果可为挡水构筑物的相关设计提供参考。

关键词: 混凝土拱坝; 地震; 有限元模拟; 响应规律; 坝体高度

中图分类号: TV642.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2023)08-0105-04

1 引言

近 30 年来, 我国相继建成了二滩、溪洛渡、锦屏一级、小湾、白鹤滩等一大批 300 m 级特高拱坝。坝体越高, 混凝土土方量越大, 混凝土的生产、运输和浇筑等难度相应增加, 材料的温控、防裂等技术质量要求亦更为严格, 施工费用大幅增加^[1]。同时, 由于不同高拱坝的坝址地形条件、设计要求、体型及荷载参数均不相同, 因此动力计算结果无法直接进行比较。考虑到当下及未来工程的安全性、经济性及施工的难易程度等多重因素, 针对具体地形, 选用合理高度的拱坝越来越受到关注。目前对各高拱坝已进行了大量的整体抗震安全性分析^[2,3], 但对同一场址下不同坝体高度的地震动响应规律研究尚不多见, 且无相关规范对此问题进行说明。因此, 本文以某工程项目为基础, 在同一坝址建立了三个不同坝高的拱坝模型, 考虑横缝接触非线性, 坝体混凝土采用经过试验验证的塑性损伤本构模型模拟真实地形, 并根据场地条件选择 100 年内超越概率为 2% 的地震波, 进行了拱坝—地基—库水系统的非线性动力时程计算, 分别从坝体自振频率、应力、位移、横缝开度等角度探讨了不同坝高拱坝在实际工程中的地震动响应规律。

2 工程概况及有限元模型

2.1 工程概况及参数

某工程坝址区地貌呈高山峡谷地形特征, 河流整体呈弧形弯曲, 河谷呈“V”形, 挡水建筑物为混凝土对数螺旋双曲拱坝, 设计了三种不同坝高方案, 最大坝高分别为 270、280、298 m, 相应的坝顶高程分别为 3 225、3 235、3 255 m, 建基面高程分别为 2 955、2 955、2 957 m。坝顶左、右拱端及拱冠厚度均为 10 m, 坝底左、右拱端厚度分别为 57、60、70 m, 拱冠厚度分别为 57.0、60.0、64.5 m。三种拱坝均设置 22 条横缝, 共 23 个坝段。

拱坝混凝土选用塑性损伤本构模型^[4]。坝体混凝土静弹性模量为 31.5 GPa, 动力反应计算中按静弹性模量的 1.5 倍取值, 泊松比为 0.167, 重度为 24 kN/m³, 线膨胀系数为 $1 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$, 导热系数为 1.74 W/(m·K), 抗拉强度为 2.05 MPa, 断裂能为 150 N/m。地基岩体弹性模量为 21.5 MPa, 泊松比为 0.26, 重度为 26 kN/m³。材料阻尼采用 Rayleigh 阻尼, 阻尼比取 0.05。

2.2 模型及荷载

分别建立三种不同坝高的拱坝—地基模型(图 1), 横河向、顺河向及竖直向地基范围均为坝

收稿日期: 2022-07-20, 修回日期: 2022-10-07

基金项目: 国家自然科学基金项目(52079025)

作者简介: 郭嘉晖(1998-), 女, 博士研究生, 研究方向为结构抗震安全计算, E-mail: gjhui@mail.dlut.edu.cn

通讯作者: 李静(1974-), 女, 博士、副教授, 研究方向为结构抗震安全计算, E-mail: lijing@dlut.edu.cn

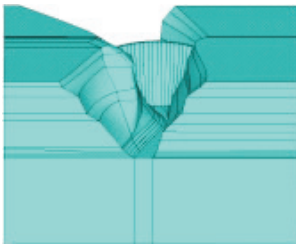


图 1 坝体—地基系统模型

Fig. 1 Dam-foundation system model

高的 1.5 倍。为了精确模拟无限地基的影响,基于刘晶波等^[5,6]提出的粘弹性边界和地震动输入,横缝采用面—面接触模型。坝体的静力荷载主要包括坝体自重、正常蓄水位工况的上下游水

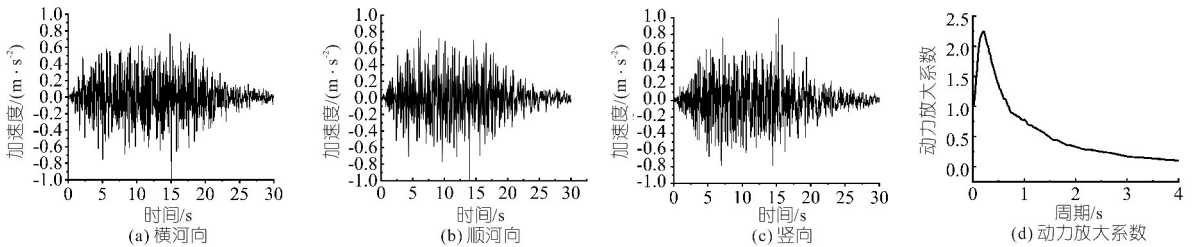


图 2 归一化后的三向地震波加速度时程记录和动力放大系数

Fig. 2 Scaled three-component ground motion records and dynamic amplification coefficient

表 2 正常蓄水位工况下拱坝前 2 阶自振周期及其动力放大系数

Tab. 2 The first two natural periods and dynamic amplification coefficients of arch dam under normal water level

坝高 /m	1 阶		2 阶	
	自振周期	动力放大系数	自振周期	动力放大系数
270	0.91	0.818 5	0.85	0.847 5
280	0.93	0.798 5	0.88	0.832 0
298	0.97	0.776 5	0.92	0.809 0

3 自振频率及振型分析

三种坝高方案在空库和正常蓄水位下的前 10 阶自振频率及正常蓄水位的前 3 阶振型见表 1、图 3,正常蓄水位工况下前 2 阶自振周期对应的地震波反应谱动力放大系数见表 2。

表 1 拱坝不同工况下前 10 阶自振频率

Tab. 1 First 10 natural frequencies of arch dam under different working conditions

工况	坝高 /m	自振频率/Hz									
		1 阶	2 阶	3 阶	4 阶	5 阶	6 阶	7 阶	8 阶	9 阶	10 阶
拱坝	270	1.46	1.76	2.30	2.89	3.11	3.19	3.58	4.07	4.09	4.33
	280	1.43	1.72	2.23	2.79	3.01	3.09	3.51	3.97	3.98	4.19
	298	1.41	1.68	2.17	2.66	2.89	2.92	3.41	3.76	3.82	3.95
正常蓄水位	270	1.10	1.18	1.76	1.98	2.34	2.47	2.95	3.14	3.18	3.52
	280	1.07	1.14	1.69	1.91	2.26	2.37	2.84	3.02	3.10	3.22
	298	1.03	1.09	1.60	1.84	2.18	2.19	2.73	2.86	2.96	2.99

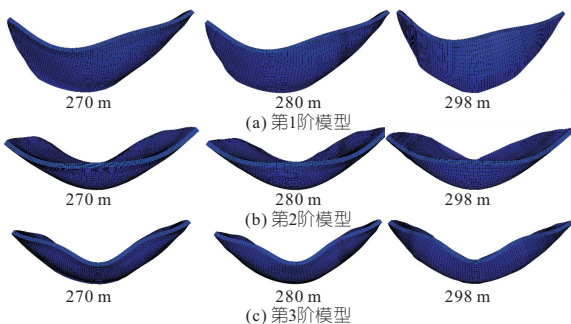


图 3 不同坝高坝体正常蓄水位工况下前 3 阶振型

Fig. 3 First three vibration modes under normal water level conditions of different dam heights

压力、淤沙压力及温度荷载,其中,三种坝高设计的上游正常蓄水位分别为 3 220、3 230、3 250 m,坝前泥沙淤积高程均按 100 年取值,为 3 132.9 m,泥沙内摩擦角取 20°,泥沙浮重度取 0.75 kN/m³,温度荷载仅考虑温升情况。

对于动力计算,动水压力采用附加质量的形式施加,计算按照《水电工程水工建筑物抗震设计规范》(NB635047-2015)^[7]规定。场地类型为 I 类,调整后的特征周期为 0.30 s,100 年超越概率 2%的设计地震水平加速度为 0.340g,竖向加速度为水平向的 2/3,地震波持时 30 s,图 2 为归一化后的三向地震加速度时程记录和动力放大系数。

由表 2 可看出,无论是空库还是正常蓄水位,拱坝各阶自振频率均随坝体高度的增加而减小,而不同坝高的振型基本上一致;拱坝前 2 阶自振周期对应的动力放大系数随着坝高的增加均呈减小趋势。

对于空库的自振频率,298 m 坝高坝体的第 1 阶频率为 270 m 坝高坝体的 0.965 倍,298 m 坝高坝体的第 10 阶频率为 270 m 坝高坝体的 0.912 倍;对于正常蓄水位的自振频率,298 m 坝高坝体的第 1 阶频率为 270 m 坝高坝体的 0.936 倍,298 m 坝高坝体的第 10 阶频率为 270 m 坝高坝体的 0.849 倍。由此可得,库水附加质量对坝体高阶频率的影响较低阶频率更大,且对拱坝正常蓄水位工况自振频率的影响较空库工况更大。

4 计算结果与分析

4.1 坝体拱向应力响应分析

对于拱向应力,由于横缝在强震过程中会发生张开,拱向拉应力会发生释放。分析拱向压应力可知,三种坝高方案坝体在上、下游面呈现相似分布规律,应力最大值均在坝顶拱冠梁附近。从表 3 可看出,上游面拱向压应力最大值随着坝高的增加呈逐渐增加的趋势,298 m 坝高下的应力最大值较 270 m 坝高提高近 28.5%;下游面应力值 270 m 坝高与 280 m 坝高相差不足 1%,而 298 m 坝高的应力值提高较明显,较 270 m 坝高应力最大值提高了 14.3%。

表 3 不同坝高坝体上、下游面拱向最大压应力值

Tab. 3 The maximum arch compressive stress on the upstream and downstream faces for different dam heights

拱向压应力	上游面			下游面		
	270 m	280 m	298 m	270 m	280 m	298 m
最大值/MPa	-11.35	-12.97	-14.59	-10.85	-10.79	-12.4
较 270 m 提高程度/%	0.00	14.30	28.50	0.00	-0.60	14.3

4.2 坝体梁向应力响应分析

三种坝高的坝体梁向应力分布基本一致,上游面梁向拉应力较大值主要分布在坝面中上部、坝底及右侧拱端中下部附近区域,坝面中上部区域中心应力值分别为 1.8、1.7、2.5 MPa(其中上游面 270、280 m 坝高最大值均在坝底右拱端附近,290 m 坝高最大值均在拱冠梁底部附近);下游面梁向拉应力主要分布在坝面中上部区域,下游面各坝高最大值均位于拱冠梁中上部附近。不同坝高下坝体上下游面的梁向拉应力最大值见表 4。由表 4 可看出,三种坝高上下游面梁向拉应力最大值较为接近,差值在 2%之内。但上游面中上部应力中心最大值,298 m 坝高的应力值远大于 270、280 m 坝高。

表 4 不同坝高坝体上、下游面梁向最大拉应力

Tab. 4 The maximum beam tensile stress on the upstream and downstream faces for different dam heights

梁向拉应力	上游面			下游面		
	270 m	280 m	298 m	270 m	280 m	298 m
最大值/MPa	2.55	2.51	2.6	2.52	2.55	2.48
较 270 m 提高程度/%	0	-1.6	2.0	0	1.2	-1.6

上游面梁向压应力的较大值主要分布在拱冠梁附近中部及坝底附近区域,其中最大值均位于拱冠梁中部。三种坝高坝体中部梁向压应力分布值分别在 5.0~6.5、6.0~7.2、6.0~6.8 MPa 之间;下游面 270、280、298 m 坝高最大值均位于拱冠梁底部。不同坝高下坝体下游面的梁向压应力

最大值见表 5,上游面梁向压应力最大值随着坝高的增加呈增加趋势,其中,298 m 坝高应力值最大,比 270 m 坝高应力值提高 12.3%,280 m 坝高与 298 m 坝高的应力值较为接近;下游面梁向压应力最大值随着坝高的增加呈减小趋势,270 m 坝高应力值最大,298 m 坝高应力值较 270 m 坝高应力最大值降低 17.1%,280 m 坝高与 298 m 坝高的应力最大值较为接近。

表 5 不同坝高坝体上、下游面梁向最大压应力

Tab. 5 The maximum beam compressive stress on the upstream and downstream faces for different dam heights

梁向压应力	上游面			下游面		
	270 m	280 m	298 m	270 m	280 m	298 m
最大值/MPa	-6.65	-7.34	-7.47	-8.83	-7.41	-7.32
较 270 m 提高程度/%	0	10.4	12.3	0	-16.1	-17.1

4.3 坝体位移响应分析

对于顺河向位移,三种坝高的坝体均表现出相同的分布规律,上游面自拱冠梁顶部附近向左右两侧及下部均呈递减的规律,正、负向位移的最大值均出现在拱冠梁顶部。

表 6 为不同坝高下坝体上、下游面顺河向最大位移。由表 6 可看出,顺河向正向位移随着坝高的增加呈先增大后减小趋势,最大值均位于拱冠梁顶部,270 m 坝高位移值最小,280 m 坝高与 298 m 坝高相差不大。顺河向负向位移值随着坝高的增加位移值先减小后增大,最大值均位于拱冠梁顶部,280 m 坝高位移值最小,298 m 坝高与 270 m 坝高相差不大。

表 6 不同坝高坝体上、下游面顺河向最大位移

Tab. 6 The maximum consequent displacement on the upstream and downstream faces for different dam heights

最大位移	上游面			下游面		
	270 m	280 m	298 m	270 m	280 m	298 m
正向位移/cm	12.95	18.63	18.25	13.05	18.66	18.38
正向位移较 270 m 提高程度/%	0	44	41	0	43	41
负向位移/cm	11.35	8.62	11.19	11.27	8.71	11.12
负向位移较 280 m 提高程度/%	31.7	0	29.8	29.4	0	27.7

图 4 为不同坝高下坝顶上游面顺河向位移的变化曲线。由图 4 可看出,随着坝高的增加,正向位移最大值呈先增后减的趋势,负向位移最大值

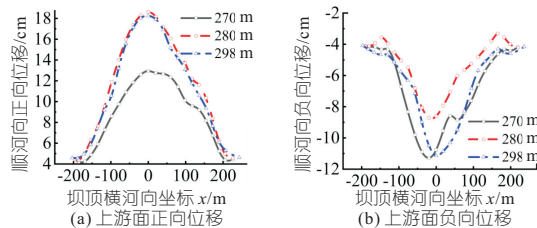


图 4 不同坝高坝体顶部上游面顺河向位移分布

Fig. 4 Distribution of consequent displacement of dam crest on upstream face of dam under different dam heights

呈先减后增的趋势。其中,280 m 坝高下的正向位移值最大,较 270 m 坝高的最小值增大约 43.9%;270 m 坝高下的负向位移值最大,较 270 m 坝高的最小值增大约 30.9%;而 298 m 坝高下的位移最大值与正、负向位移最大值均相差不大。

4.4 坝体横缝开度分析

三种坝高的横缝开度主要集中在坝体左右拱端及拱冠梁附近的横缝上部,两侧横缝开度大、中间横缝开度小。上游面最大开度位置均在从左侧开始第 1 条横缝坝顶处,最大值分别为 1.45、2.01、1.19 cm;下游面最大开度位置略有不同,270 m 坝高坝体横缝开度最大值出现在从左侧开始第 1 条横缝的坝顶位置,为 1.28 cm;280、298 m 坝高坝体横缝开度最大值均出现在从右侧开始第 1 条横缝的坝顶位置,分别为 1.59、1.34 cm。

图 5 为不同坝高坝体上、下游面最大横缝开度变化情况。由图 5 可看出,上、下游面横缝开度最大值的变化规律相同,均随着坝高增加横缝开度最大值先增大后减小,280 m 坝高下的横缝开度最大。以 270 m 坝高坝体的最大横缝开度值为计算基准,上游面 280 m 坝高坝体增大了 38.6%,298 m 坝高坝体减小了 17.9%;下游面 280 m 坝高坝体增大了 24.2%,298 m 坝高坝体增大了 4.7%。

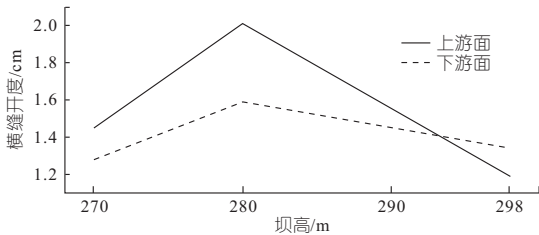


图 5 不同坝高坝体最大横缝开度变化

Fig. 5 Variation of maximum transverse joint opening for different dam heights

5 结论

a. 在正常蓄水位和空库两种工况下,各阶自振频率随坝高的增加而减小;坝体在正常蓄水位工况的高阶自振频率受库水附加质量的影响更大。

b. 上游面拱向和梁向压应力最大值随坝高的增加而增大,下游面梁向压应力最大值随坝高的增加而减小,下游面拱向压应力和上、下游面梁向拉应力均为坝高 298 m 最大,坝高 270、280 m 相差不大;三种坝高顺河向正向位移最大值及横缝开度最大值均随坝高增加呈先增后减的趋势。

c. 在正常蓄水位工况下,三种坝高拱坝前两阶自振周期对应的动力放大系数随坝高的增加呈减小趋势,同时受惯性力和刚度的影响,拱坝地震响应又会随着坝高的增大而增大,两者存在对立,因此高拱坝地震响应随着坝高的增加并非呈单调变化。

参考文献:

- [1] 王仁坤. 我国特高拱坝的建设成就与技术发展综述[J]. 水利水电科技进展, 2015, 35(5): 13-19.
- [2] 熊堃, 翁永红, 胡中平, 等. 乌东德高拱坝极限抗震能力研究[J]. 岩土力学, 2013, 34(增刊 2): 325-331.
- [3] 胡良明, 刘伟莹, 朱军福, 等. 地震动峰值速度对小湾拱坝动力响应的影响分析[J]. 水电能源科学, 2021, 39(4): 64-67, 145.
- [4] LEE J, FENVES G L. A plastic-damage concrete model for earthquake analysis of dams[J]. Earthquake engineering & structural dynamics, 1998, 27(9): 937-956.
- [5] 谷音, 刘晶波, 杜义欣. 三维一致粘弹性人工边界及等效粘弹性边界单元[J]. 工程力学, 2007(12): 31-37.
- [6] 何建涛, 马怀发, 张伯艳, 等. 黏弹性人工边界地震动输入方法及实现[J]. 水利学报, 2010, 41(8): 960-969.
- [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.

Comparison and Study on Seismic Response of Arch Dams with Different Design Heights

GUO Jia-hui¹, LI Jing¹, SHI Li^{1, 2}, XU Qiang¹, CHEN Kun-qiang¹

(1. Faculty of Infrastructure Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China;

2. PowerChina Xibei Engineering Corporation Limited, Xi'an 710065, China)

Abstract: In the construction of hydropower projects under the same dam site, the height of water-retaining structures is a key index affected by many factors. In this paper, the responses of three design dam height schemes of a water-retaining structure under static and dynamic superposition conditions were analyzed. The results show that although the dead weight and reservoir water pressure of the arch dam increase with the increase of the dam height, the ground motion response of the arch dam does not all increase with the increase of the dam height. In this calculation case, the beam compressive stress and arch compressive stress on the upstream surface of the arch dam increase with the increase of the dam height, the beam compressive stress on the downstream surface decreases with the increase of the dam height, and the arch compressive stress first decreases and then increases with the increase of the dam height, the forward displacement and openness first increase and then decrease with the increase of the dam height. The research results can provide a reference for the design of water-retaining structures.

Key words: concrete arch dam; earthquake; finite element simulation; response law; dam height