

拱坝坝后电梯井结构应力变化规律研究

刘鹏¹, 邓恒², 李守义³, 赵珍⁴, 李丹⁵

(1. 江西省水利规划设计研究院, 江西 南昌 330029; 2. 江西柘林水电厂, 江西 九江 332000; 3. 西安理工大学, 陕西 西安 710048; 4. 杨凌职业技术学院, 陕西 杨凌 712100; 5. 江西科技学院 管理学院, 江西 南昌 330098)

摘要: 因拱坝坝后电梯井结构自身的特殊性,其应力沿高度变化规律与一般电梯井结构不同,目前大部分学者研究拱坝坝后电梯井时,对其内部结构进行了简化。采用 ANSYS 有限元软件分析电梯井无内部结构与增加内部结构在正常与地震工况下应力沿自身高度的变化规律。结果表明:当电梯井结构在正常工况和地震工况时,电梯井位于坝体内部结构主要为压应力,与坝体连接处拉应力较大,拉应力值沿电梯井高度逐渐降低。当电梯井模拟增加内部结构时,电梯井位于坝体内部结构压应力增加,与坝体连接处拉应力值降低。研究结果可为拱坝坝后电梯井设计提供参考。

关键词: 拱坝; 坝后电梯井; 地震; 动力法; 自振频率

中图分类号:TV642.4

文献标识码:A

文章编号:1672-643X(2019)04-0131-07

Research on stress change law of elevator shaft downstream the arch dam

LIU Peng¹, DENG Heng², LI Shouyi³, ZHAO Zhen⁴, LI Dan⁵

(1. Jiangxi Provincial Water Conservancy Planning and Designing Institute, Nanchang 330029, China; 2. Jiangxi Zhelin Hydropower Plant, Jiujiang 332000, China; 3. Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China; 4. Yangling Vocational & Technical College, Yangling 712100, China; 5. School of Management, Jiangxi University of Technology, Nanchang 330098, China)

Abstract: Due to the particularity structure of the elevator shaft downstream the arch dam, the variation law of the stress along the height is different from that of the general elevator shaft. At present, most studies simplified the internal structure of the elevator shaft downstream the arch dam. This study used the ANSYS finite element software to analyze the variation of the internal structure of the elevator shaft without increasing the internal structure and increasing the internal structure under normal and seismic conditions. The results showed that: when the structure of the elevator shaft is under normal working conditions and seismic conditions, the internal structure of the elevator shaft is mainly compressive stress, and the tensile stress at the joint with the dam is large, and the tensile stress value gradually decreases along the height of the elevator shaft. When the elevator shaft is simulated to increase the internal structure, the compressive stress of the elevator shaft increased in the internal structure of the dam, and the tensile stress value at the joint with the dam reduced. This study provides reference for the design of the elevator shaft downstream the arch dam.

Key words: arch dam; elevator shaft downstream the arch dam; earthquake; dynamic method; natural vibration frequency

1 研究背景

随着我国水利行业的飞速发展,李家峡(165 m)^[1-2]、二滩(245 m)^[3]、溪洛渡(278 m)^[4-5]、锦平

一级(305 m)^[6]等一大批高拱坝相继建成,中国高拱坝的设计与施工水平已经由 200 m 级成功迈进 300 m 级^[7-8]。随着我国建设拱坝的高度不断提高^[9],电梯井的使用在拱坝日常运行中起到越来越

收稿日期:2018-10-23; 修回日期:2018-12-21

基金项目:国家自然科学基金项目(51579208、51409207、51309190); 中央财政支持地方高校发展专项(106-5X1205); 陕西省重点学科建设专项(106-00X903)

作者简介:刘鹏(1993-),男,江西九江人,硕士,工程师,主要从事水工结构设计及数值仿真研究。

通讯作者:李守义(1955-),男,甘肃庄浪人,博士,教授,博士生导师,主要研究方向为水工结构分析及数值仿真。

关键的作用。电梯井可布置在坝内、坝外以及布置成坝体内外相结合的形式。由于拱坝坝身较薄,电梯井一般都布置于坝后处,与拱坝坝体呈内外结合的形式。拱坝坝后电梯井结构受力情况比一般电梯井结构更为复杂。由于我国是一个多地震的国家,很多大坝都位于地震高烈度区^[10],而拱坝坝后电梯井属于高耸结构,地震对其影响极大。当坝体振动时,因动力放大^[11]的影响,电梯井结构会承受更大的振动。故分析拱坝电梯井结构时,应对地震工况时做重点研究。我国水利技术发展相对于西方发达国家较晚^[12],在对拱坝电梯井方面的研究相对较少。魏鹏等^[13]对高拱坝坝后电梯井进行动力分析,对在电梯井与坝体间回填混凝土对电梯井壁应力影响进行了研究。吴从晓等^[14]对电梯井核心筒剪力墙在高位层间隔震结构中处理方法进行了研究。这些研究基本都对电梯井内部结构进行了简化。

因电梯井自身结构的特殊性,结构内部需设置楼梯层、隔墙及电梯通道等,电梯井增加内部结构对电梯井应力影响较大。为更加真实地模拟拱坝坝后电梯井实际使用情况,本文采用 ANSYS^[15-16]有限

元软件,以某混凝土拱坝为例,模拟电梯井增加内部楼梯层、隔墙及电梯通道等结构,分析在正常与地震工况下电梯井结构应力随高度变化规律,模拟增加内部结构时应力变化情况,并与电梯井无内部结构进行对比分析。

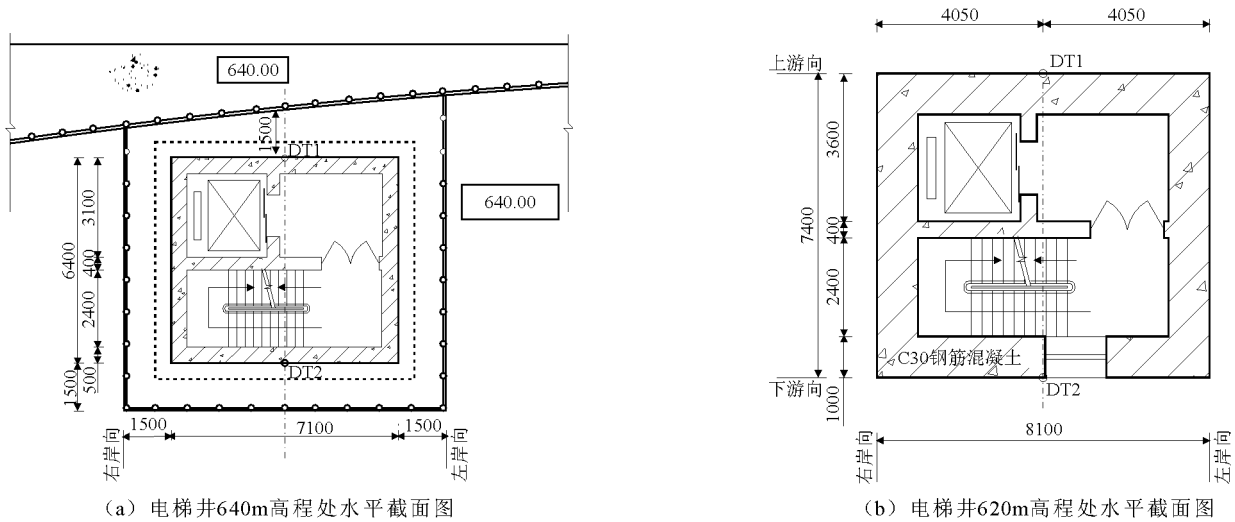
2 工况概况

2.1 工程简介

某工程为 I 等工程,正常蓄水位库容 $6.51 \times 10^8 \text{ m}^3$,水库总库容 $6.85 \times 10^8 \text{ m}^3$ 。拱坝体型为抛物线双曲拱坝^[17],坝底高程 495.0 m,坝顶高程 640.0 m,坝高 145.0 m,正常蓄水位高程 638 m,坝顶宽 9.0 m,坝底厚 40.5 m。

2.2 电梯井结构型式

电梯井结构布置为坝体内外相结合的形式,电梯井底部起始高程为 509 m,电梯井高度 0 ~ 24 m 全部位于坝体内部,高度 24 ~ 63 m 部分位于坝体内部,高度 63 ~ 131 m 全部位于坝体外部。电梯井内部楼梯层间隔 1.5 m,厚度 0.12 m;内部隔墙厚度 0.4 m,四周侧墙厚度 1.0 m。具体结构型式见图 1。



(注:图中高程以 m 计,其余尺寸以 mm 计。)

图 1 电梯井结构型式图

2.3 材料力学参数

材料参数取值见表 1。

表 1 各材料实验参数

材料参数	坝体 C25	岩体参数	
		高程 623m 以上	高程 623m 以下
线胀系数/ $10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$	9.6	10.0	10.0
容重/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	24	27	27
泊松比	0.179	0.301	0.263
弹性模量/GPa	20	9	15

3 计算模型与荷载

3.1 模型建立

计算模型中坝体沿坝基面向下延伸约 1 倍坝高,向上游延伸约 1 倍坝高,向下游延伸约一倍的坝高,左右岸山体法向延伸约一倍坝高^[18]。整体模型采用 SOLID65^[19]单元划分网格,电梯井结构网格尺寸 0.12 ~ 1 m,坝体网格尺寸 1 ~ 3 m,部分不规则体型用四面体网格单元进行过渡,其余部分均采用六

面体网格单元。整体模型节点总数为 512 444,单元总数为 192 107。坐标系选取:顺水流方向为 x 轴方向,向下游为正;沿高度方向为 y 轴方向,向上为正;坝轴线方向为 z 轴方向,向右岸为正。计算模型坐标原点在拱冠梁处,为减小计算误差,不同方案模型中相同结构网格剖分尺寸相同^[20]。有限元模型见图 2~3。

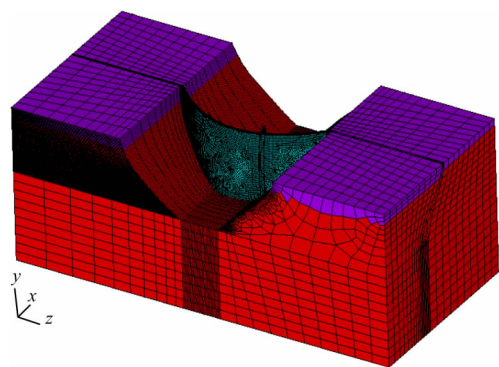


图 2 整体有限元计算模型

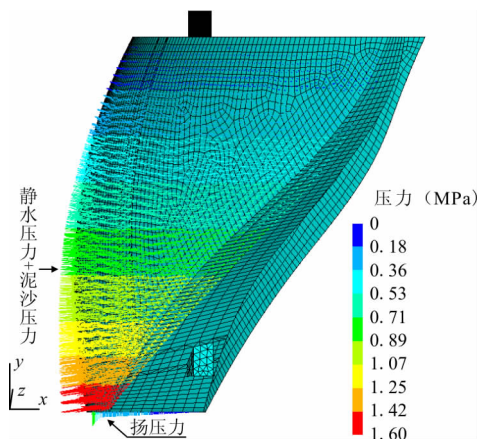


图 3 坝体有限元计算模型

3.2 边界条件及基本假定

模型底部施加三向约束,模型四周侧面施加法向约束。假定材料为各向同性、均匀连续的线弹性体,不考虑混凝土和钢筋的塑性发展^[21]。

3.3 计算方案及荷载

电梯井结构正常工况时计算荷载如下:

- (1)自重。加速度取 9.8 m/s^2 。
- (2)泥沙压力。泥沙淤积高程 530 m,淤沙容重 8 kN/m^3 。
- (3)水压力。坝体上游面按上游正常蓄水位 637 m 施加;下游无水,故不施加水压力。
- (4)扬压力。折减系数取 0.25。

在考虑地震作用效应时,还应考虑作用于坝面的动水压力^[22]。本工程地震烈度为 7 级,根据《水

电工程水工建筑物抗震设计规范》^[23]不考虑竖向地震作用,水平向设计地震加速度代表值 $\alpha_h = 0.1g$ 。

本文施加地震力采用方法为动力法(振型分解反应谱法),设计反应谱^[24]应根据结构自振周期 T 和场地类别按图 4 取值。

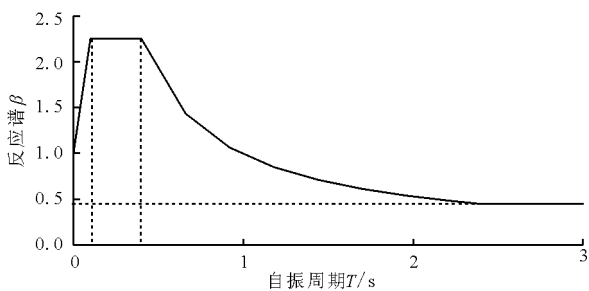


图 4 设计反应谱

地震反应谱 β 取值见表 2。

表 2 地震反应谱 β 取值

振型	周期 T/s	地震反 应谱 β	频率 $\text{freq}/$ Hz	频谱值 SV
1	0.00001	1.00	100000	0.98
2	0.10	2.25	10.00	2.21
3	0.40	2.25	2.50	2.21
4	0.66	1.43	1.52	1.40
5	0.92	1.06	1.09	1.04
6	1.18	0.85	0.85	0.83
7	1.44	0.71	0.69	0.70
8	1.70	0.61	0.59	0.60
9	1.96	0.54	0.51	0.53
10	2.22	0.48	0.45	0.47
11	2.39	0.45	0.42	0.44
12	2.65	0.45	0.38	0.44
13	3.00	0.45	0.33	0.44

注: SV 为与频率点关联的频谱值。

设计反应谱最大值的代表值 $\beta_{\max} = 2.25$,根据资料此工程场地为三类场地,其特征周期 $T_g = 0.40\text{ s}$ 。总的地震作用效应取各方向的地震作用效应平方和的方根值。略去地震作用效应影响不超过 5% 的高阶振型。并对地震作用效应进行折减,折减系数取 0.35。按照公式(1)将水平向单位地震动水压力折算为相应的坝面径向附加质量。

$$p_w(h) = \frac{7}{8} a_h \rho_w \sqrt{H_0 h}$$

(1)

式中: $p_w(h)$ 为作用在直立迎水坝面水深 h 处的地震动水压力代表值; ρ_w 为水体质量密度标准值,取 1000 kg/m^3 ; H_0 为水深,取 142m。

在 ANSYS 中用 MASS21 单元以附加质量形式施加动水压力。使用振型分解反应谱计算时,选取前 15 阶振型。

4 结果与分析

4.1 正常工况

正常工况下,电梯井增加内部结构第一主应力最大值减小 1.01 MPa;第三主应力最大值减小 2.13 MPa; x 向(顺水流)拉应力最大值减小 1.43 MPa,压应力最大值减小 1.16 MPa; y 向(竖直向)拉应力最大值减小 0.12 MPa,压应力最大值减小 1.79 MPa; z 向(横河向)拉应力最大值增大 0.58 MPa,压应力最大值减小 1.32 MPa,详见表 3。第一主应力图见图 5~6。

为更具体分析电梯井增加内部结构在不同高度对其应力的影响,从电梯井底部至顶部沿其高度在左侧墙上(拉应力最大侧墙)均匀取 100 个点分析电梯井增加内部结构对电梯井的影响。分别对电梯井无内部结构和增加内部结构两种情况的 S_1 (第一主应力)、 S_3 (第三主应力)、 S_x (x 向应力)、 S_y (y 向应力)、 S_z (z 向应力)沿电梯井高度分布规律进行对比,详见图 7。

表 3 正常工况应力极值 MPa

应力	无内部结构		增加内部结构	
	最大值	最小值	最大值	最小值
S_1	4.84	-1.89	3.83	-1.52
S_3	0.00	-17.63	0.01	-15.5
S_x	4.19	-10.07	2.76	-8.91
S_y	0.16	-7.50	0.04	-5.71
S_z	1.99	-8.80	2.57	-7.48

表 4 动力法施加地震惯性力应力极值 MPa

应力	无内部结构		增加内部结构	
	最大值	最小值	最大值	最小值
S_1	5.30	-1.07	4.01	-0.97
S_3	0.08	-17.72	0.01	-15.17
S_x	4.66	-9.33	3.09	-8.25
S_y	1.18	-7.12	0.47	-5.06
S_z	2.23	-8.04	2.93	-6.85

电梯井增加内部结构在正常情况时,第一主应力在电梯井高度 0~50 m 处减小,在约 35 m 处减小幅度最大,在高度 50 m 之后,两者第一主应力情况趋于一致;第三主应力在高度 0~30 m 处减小,在高

度 60 m 后无明显变化。 x 向压应力在高度 0~30 m 处增大, x 向拉应力在高度 30~40 m 处减小,在约 35 m 处减小幅度最大,高度 60 m 后两者趋于一致。 y 向压应力在高度 30~60 m 处小幅增加。 z 向应力在高度 0~60 m 处拉应力减小,压应力增大。

4.2 地震工况

地震工况下,电梯井增加内部结构第一主应力最大值减小 1.29 MPa;第三主应力最大值减小 2.55 MPa; x 向(顺水流)拉应力最大值减小 1.57 MPa,压应力最大值减小 1.08 MPa; y 向(竖直向)拉应力最大值减小 0.71 MPa,压应力最大值减小 2.06 MPa; z 向(横河向)拉应力最大值增大 0.7 MPa,压应力最大值减小 1.19 MPa,详见表 4。第一主应力图见图 8~9。

从电梯井底部至顶部沿其自身高度在左侧墙均匀取 100 个点分析电梯井增加内部结构对电梯井的影响规律。对两种情况的 S_1 (第一主应力)、 S_3 (第三主应力)、 S_x (顺水流向应力)、 S_y (竖直向应力)、 S_z (横河向应力)不同高度规律进行对比,详见图 10。

由图 10 可看出,电梯井增加楼梯层等内部结构在地震工况时,第一主应力在电梯井高度 0~50 m 范围内明显较小,在约 35 m 处减小幅度最大,在高度 50m 之后,两者第一主应力情况趋于一致;第三主应力在高度 0~30 m 处减小,在高度 30 m 后增大。 x 向压应力在高度 0~30 m 处增大, x 向拉应力在高度 30~40 m 处减小,在约 35m 处减小幅度最大,高度 60 m 后两者趋于一致。 y 向压应力沿电梯井有小幅增大。在高度 0~60 m 处 z 向拉应力明显减小,压应力明显增大。

此模型电梯井与拱坝为内外结合的形式。电梯井高度 0~35 m 部分位于坝体内部,电梯井高度 35 m 之后位于坝体外部。因电梯井与坝体接触位置刚度突变及两者的耦合影响,两种工况电梯井最大拉应力与最大压应力均出现在电梯井高度约 35 m 位置。位于坝体内部的电梯井部位,增加内部结构时第一主应力与各向拉应力有明显减小,第三主应力有小幅减小, z 向压应力明显增大。对于位于坝体外部的电梯井部位,当电梯井增加内部结构时第一主应力有明显减小,减小幅度随高度增加而降低,第三主应力有小幅增大; x 向拉应力有小幅减小,减小幅度随高度增加而降低; y 向压应力在高度 30~60 m 有小幅增大;因电梯井增加楼梯层、隔墙及电梯通道等结构,电梯井侧墙应力 z 向拉应力在高度 0~60m 处发生转移,由拉变压,最大压应力为 1.2 MPa。

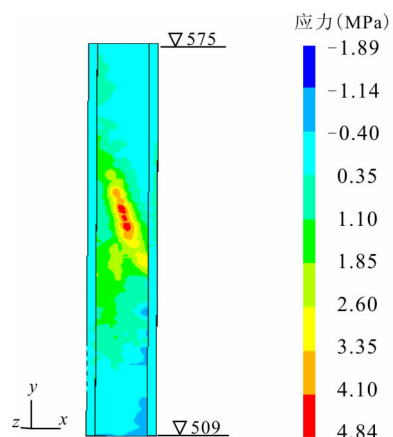


图 5 无内部结构电梯井左侧墙第一主应力图

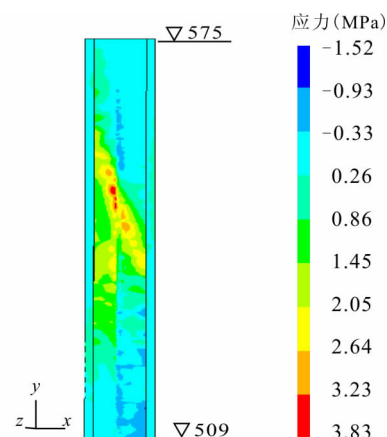


图 6 增加内部结构电梯井左侧墙第一主应力图

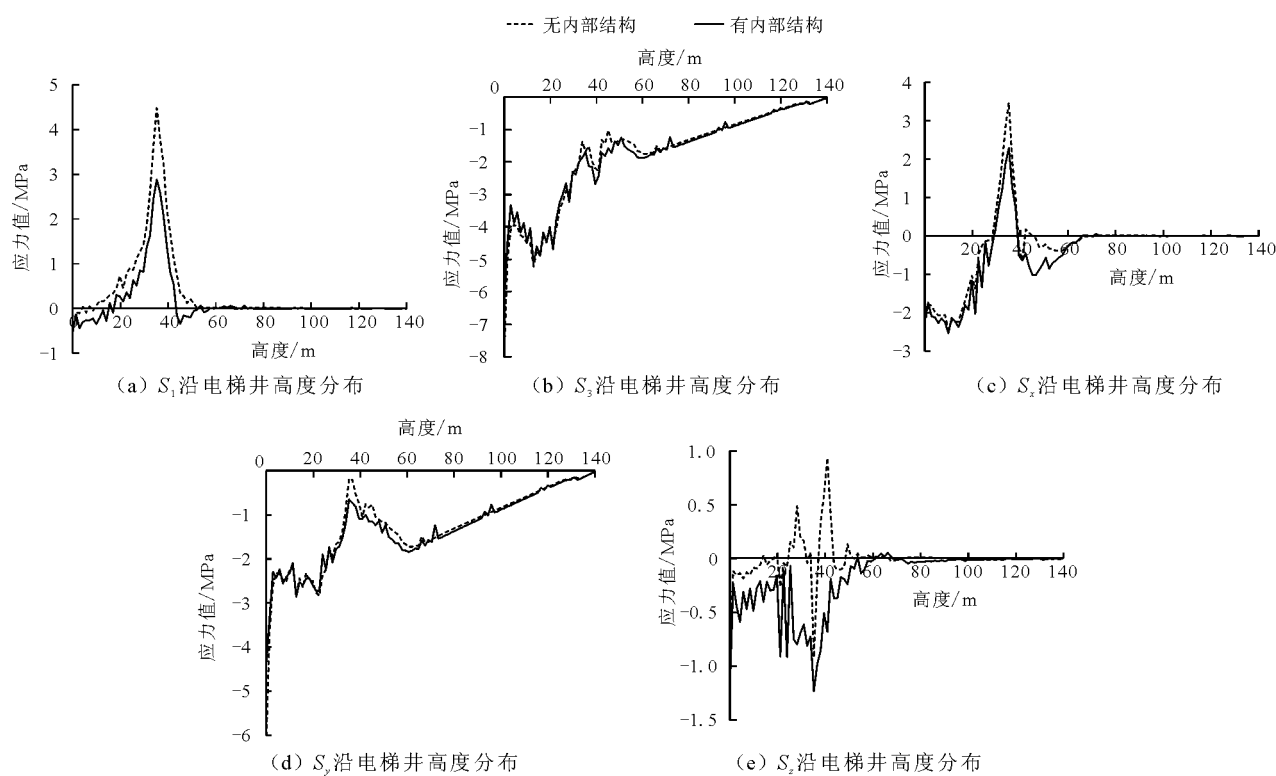


图 7 正常工况时电梯井应力随高度变化规律

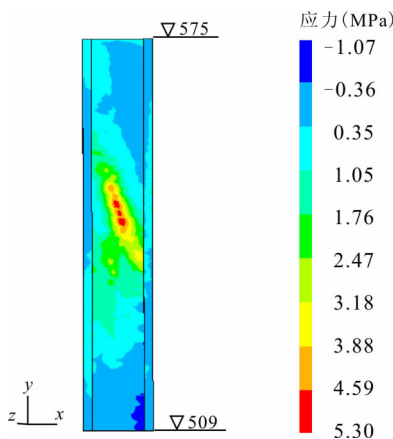


图 8 无内部结构电梯井左侧墙第一主应力图

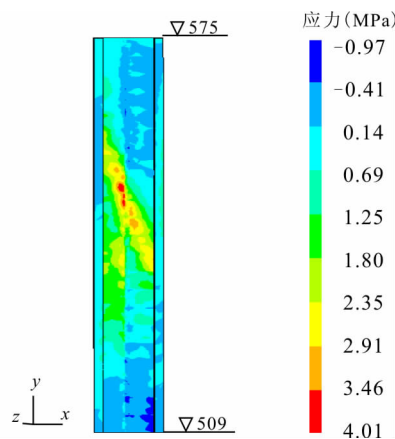


图 9 增加内部结构电梯井左侧墙第一主应力图

电梯井无内部结构和增加内部结构的前四阶振型图见图 11~12。

当电梯井模拟增加内部楼梯层等结构,各阶频率整体呈下降趋势,详见表 5。

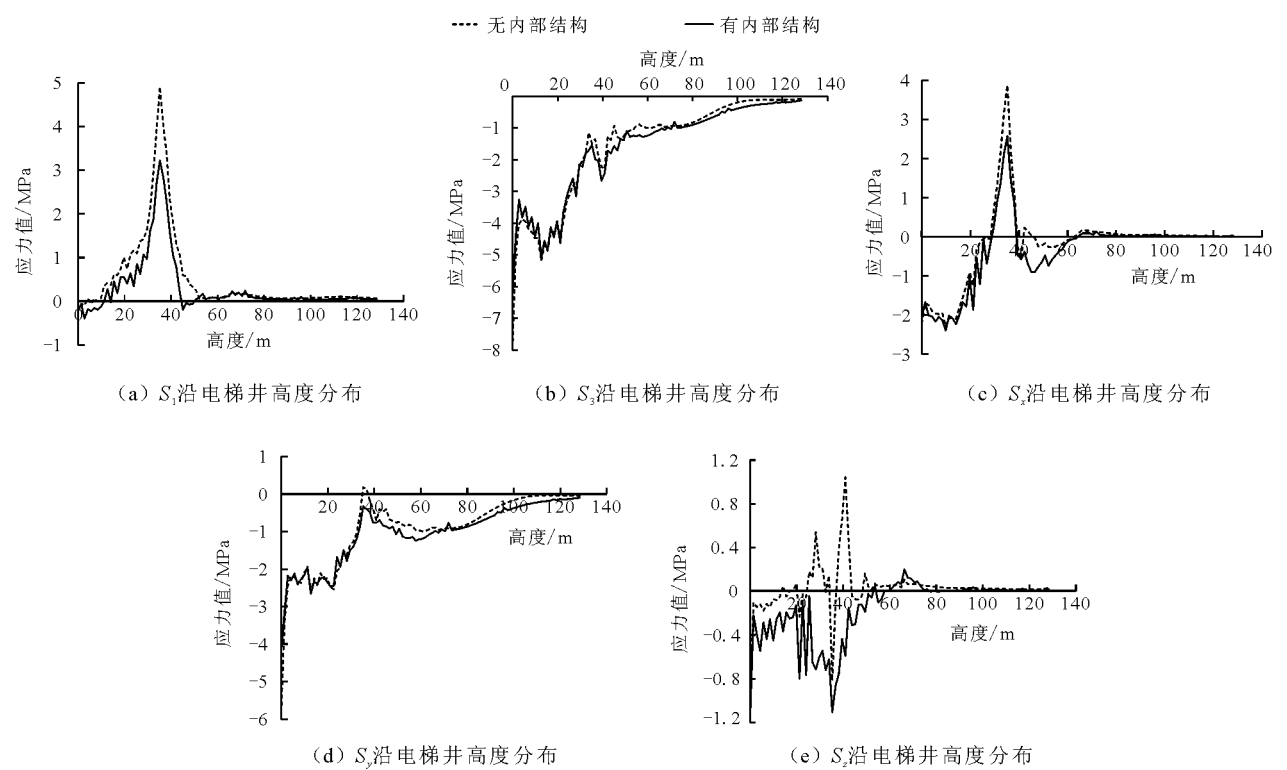


图 10 动力法施加地震惯性力时电梯井应力随高度变化规律

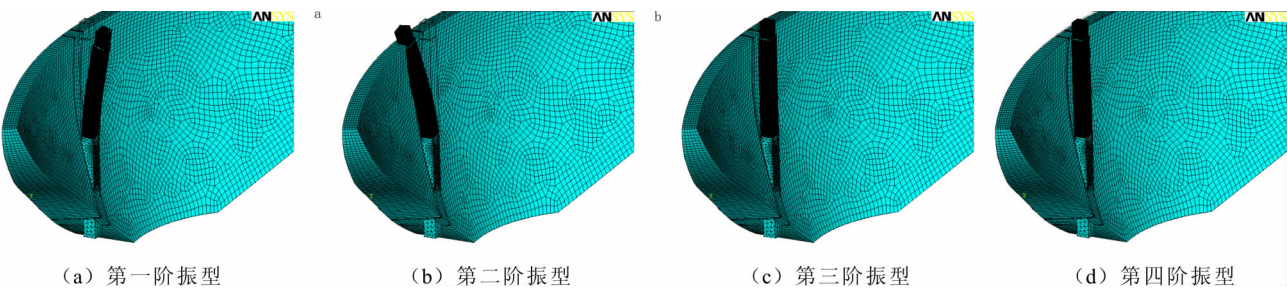


图 11 无内部结构电梯井振型图

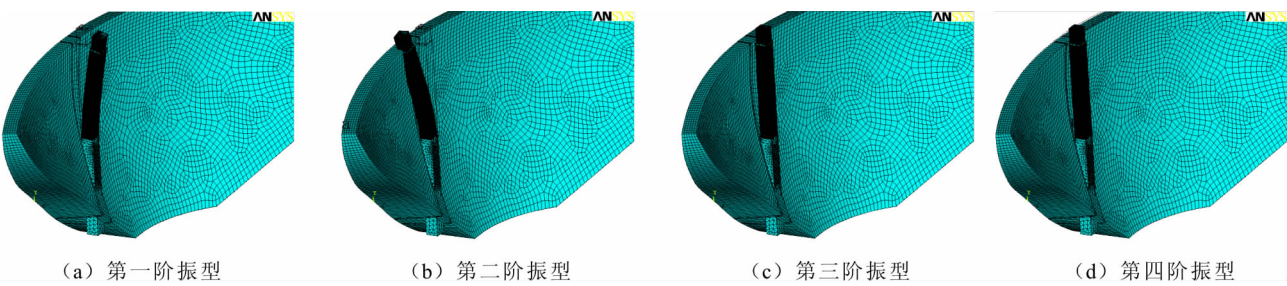


图 12 增加内部结构电梯井振型图

表 5 各种振型电梯井自振频率															Hz
结构模式	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
无内部结构	0.703	0.753	1.907	2.091	2.639	3.363	3.950	4.129	4.165	4.233	4.514	5.106	5.149	5.280	5.439
增加内部结构	0.659	0.715	1.907	2.092	2.639	3.363	3.736	4.007	4.126	4.231	4.512	5.105	5.149	5.279	5.389

5 结 论

本文通过对比分析正常工况及地震工况时电梯井有、无内部楼层等结构的情况下,电梯井应力沿其自身高度变化规律,主要得到以下结论:

(1)电梯井增加内部结构时,在正常工况下电梯井高度0~50 m范围内,第一主应力明显减小,在电梯井高度约35m处(电梯井与坝体连接处)减小幅度最大。随电梯井高度增加,水流向、横河向的拉应力减小,压应力增大,竖直向应力值无明显变化。

(2)在地震工况下,电梯井增加楼梯层等内部结构,位于坝体内部电梯井部位第一主应力与各向拉应力有明显减小,第三主应力有小幅减小,横河向压应力增大较明显。位于坝体外部电梯井部位第一主应力有明显减小,减小幅度随电梯井高度增加而降低,第三主应力有小幅增大。水流向拉应力有小幅减小,减小幅度随高度增加而降低,竖直向压应力在电梯井高度30~60 m有小幅增大,横河向拉应力减小,压应力增加。

(3)当电梯井增加内部楼梯层等结构,各阶振型频率均增大,频率增幅随振型阶数增加而降低。

参考文献:

- [1] 白俊光,林鹏,李蒲健,等. 李家峡拱坝复杂地基处理效果和反馈分析[J]. 岩石力学与工程学报,2008,27(5): 902-912.
- [2] 周维垣,杨若琼,林鹏,等. 李家峡大坝坝肩整体稳定反分析[R]. 北京:清华大学,2007.
- [3] 王进廷,杨剑,王吉焕,等. 二滩拱坝应力仿真及参数敏感性分析[J]. 水利学报,2007,38(7):832-837.
- [4] 张冲,王仁坤,汤雪娟. 溪洛渡特高拱坝蓄水初期工作状态评价[J]. 水利学报,2016,47(1):85-93.
- [5] 樊启祥,周绍武,李炳锋. 溪洛渡特高拱坝建设的岩石工程关键技术[J]. 岩石力学与工程学报,2012,31(10):1998-2015.
- [6] 黄志鹏,董燕军,廖年春,等. 锦屏一级水电站左岸开挖高边坡变形监测分析[J]. 岩土力学,2012,33(S2):235-242.
- [7] 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.

- [8] 丁陆军. 国内外拱坝体型优化研究现状及发展[J]. 长江科学院院报,2013,30(3):61-65.
- [9] 王仁坤,张冲,陈丽萍,等. 特高拱坝结构安全度再评价[J]. 长江科学院院报,2014,31(11):136-142+148.
- [10] 李静,陈健云,白卫峰,等. 地震作用下高拱坝损伤开裂分析[J]. 应用力学学报,2010,27(1):125-129+228.
- [11] 蔡建国,朱奕锋,江超,等. 基于应力比值法的张弦结构动力放大系数研究[J]. 建筑结构学报,2015,36(1):116-126.
- [12] 马洪琪. 我国坝工技术的发展与创新[J]. 水力发电学报,2014,33(6):1-10.
- [13] 魏鹏,叶林,李林峰,等. 地震作用下的电梯井结构与拱坝坝体的耦联分析[J]. 水资源与水工程学报,2009,20(6):133-136.
- [14] 吴从晓,周云,吴从永,等. 高位层间隔震结构电梯井核心筒剪力墙处理方法研究[J]. 振动与冲击,2011,30(10):77-81.
- [15] 李守义,周伟,苏礼邦,等. 基于ANSYS的拱坝等效应力研究[J]. 水力发电学报,2007,26(5):38-41.
- [16] 班宏泰,覃文文,赵昕,等. 基于ANSYS优化设计的岩体参数反演分析[J]. 水利水电科技进展,2009,29(S1):58-61.
- [17] 吴冀高. 世界上坝高在200m以上的双曲拱坝[J]. 水利水电科技进展,2001,21(2):66.
- [18] 刘鹏,李守义,赵珍,等. 高拱坝坝后式电梯井顶部连接方式探究[J]. 水资源与水工程学报,2017,28(2):147-151+155.
- [19] 霍越群,赵光宇. 利用ANSYS Solid65单元分析混凝土结构[C]//吉林省土木建筑学会2011年学术年会论文集,2011.
- [20] 邹超英,苏志敏,曾海军,等. 拱坝有限元分析网格剖分方案研究[J]. 南水北调与水利科技,2011,9(1):47-49+109.
- [21] 刘鹏. 高拱坝坝后电梯井应力分布规律研究[D]. 西安:西安理工大学,2018.
- [22] 孔宪京,许贺,邹德高,等. 不同激振方向下动水压力对高面板坝面板动应力的影响[J]. 水利学报,2016,47(9):1153-1159.
- [23] 国家能源局. 水电工程水工建筑物抗震设计规范:NB35047-2015[S]. 北京:中国电力出版社,2015.
- [24] 李平,薄景山,孙有为,等. 场地类型对反应谱平台值的影响[J]. 地震工程与工程振动,2011,31(1):25-29.