DOI:10.11705/j.issn.1672-643X.2019.01.26

高耸进水塔拦污栅墩连系梁结构体系的抗震分析

李子民, 李守义, 田 超, 王 博, 赵 洋, 杨 勇
(西安理工大学, 陕西 西安 710048)

摘 要: 针对高耸进水塔拦污栅墩连系梁结构在地震作用下容易产生较大的拉应力的现象,采用ANSYS有限元分析理论,建立进水塔有限元模型,选用反应谱法计算进水塔结构在地震作用下的动力响应。通过设计3种方案,对比研究拦污栅墩连系梁结构存在的必要性以及横梁(垂直水流向)、纵梁(顺水流向)尺寸大小对进水塔关键部位的应力和形变的影响。结果表明:高耸进水塔结构,增大横梁尺寸可减小自身轴向拉应力、并限制拦污栅墩位移。而增大纵梁尺寸则会对局部结构产生不利影响,因此适当增加横梁尺寸,减小纵梁尺寸可有效降低成本,提高结构安全度。该研究可为结构相似的进水塔拦污栅墩的连系梁尺寸调整提供参考。

关键词: 高耸进水塔; 拦污栅; 连系梁; 反应谱法; 有限元分析; 应力; 变形; 抗震分析
中图分类号:TV312 **文献标识码**: A **文章编号**: 1672-643X(2019)01-0171-05

Seismic analysis of connecting beam structure of trash rack on high-rise intake tower

LI Zimin, LI Shouyi, TIAN Chao, WANG Bo, ZHAO Yang, YANG Yong
(*Xi'an University of Technology, Xi'an* 710048, *China*)

Abstract: In view of the phenomenon that the connecting beam of the high-rise intake tower is easy to generate large tensile stress under earthquake action, the finite element model of the intake tower was established by the ANSYS finite element analysis theory, and the dynamic response of the structure under earthquake action was calculated by the reaction spectrum method. By designing three schemes, the necessity of the existence of the connecting beam structure of the trash rack and the influence of the cross beam (vertical flow direction) and the longitudinal beam (flow direction) on the stress and deformation of the key part of the intake tower are studied. The results showed that the high intake tower can decrease the axial tensile stress and limit the displacement of the barrier pier, by increasing the cross beam size. Increasing the longitudinal beam size will adversely affect the local structure. Therefore, by appropriately increase the cross beam size and reduce the longitudinal beam size can effectively reduce the cost and improve the structural safety. This conclusion provides reference for the size adjustment of the connecting beam of high intake towers with similar structures.

Key words: high-rise intake tower; trash rack; connecting beam; response spectrum method; finite element analysis; stress; deformation; seismic analysis

1 研究背景

在水利枢纽工程中,引水、泄水建筑物的进水口具有举足轻重的地位[1]。近年来,随着我国筑坝技术[2-3]快速发展,大批70 m级以上的水电站高耸进水塔相继建成。由于进水塔体型结构及其受力情况非常复杂且大部分结构修筑在水中,若产生破坏,不仅维修困难,还会导致整个水利枢纽不能正常运行。因此对高耸进水塔结构进行仿真分析和抗震研究具有重要的现实意义[4-7]。

水电站进水口一般在进口段设有拦污栅,而拦污栅墩的刚度小,稳定性差[8],工程中常通过设置连系

收稿日期:2018-08-11; **修回日期**:2018-09-27
基金项目:国家自然科学基金项目(51579208)
作者简介:李子民(1994-),男,山东济宁人,硕士研究生,研究方向为水工结构数值模拟。
通讯作者:李守义(1955-),男,甘肃庄浪人,博士,教授,博士生导师,研究方向为水工结构工程。

梁来增加拦污栅墩及其附属结构的稳定性和整体性。常见的高耸进水塔多为单薄的筒式或者箱式结构,在地震过程中容易产生变形和破坏,特别是进水塔的连系梁部位在地震工况下容易产生较大的拉应力。如何减轻连系梁的破坏程度成为一个关键的问题。Aulay P T 和 Binney J R 提出连系梁斜对角交叉配筋结构,但限于配筋成本高,施工难度大等原因,在国内并未得到推广。曹征良[9]认为将连系梁用纵向水平缝分成上、下两个相同的构件,在跨度中部用混凝土键联系,在地震作用下混凝土键逐步裂开可以有效的耗散地震能量,这种抗震连系梁在国内多种高层住宅[10]、酒店工程[11]中应用较广。宋珊珊[12]提出在连系梁间增加从上层连系梁前下部延伸至底层连系梁后上部的斜拉梁结构,可以明显提高连系梁整体结构的强度,有效限制裂缝的发展,但材料成本大大增加。

鉴于高耸进水塔拦污栅墩连系梁的相关文献较少,现有连系梁的研究多基于高层房屋建筑工程,尽管可以为高耸进水塔连系梁的设计所参考,但由于进水塔结构区别于一般意义上的高层结构,其自身具有特殊性,因此需要对其稳定性及整体性进行专项研究。本文依托于某实际工程,采用反应谱法[13-14],研究连系梁结构在不同的截面尺寸条件下,进水塔连系梁及相关部位的动力响应,并提出合理的设计尺寸,以期为高耸进水塔的连系梁结构尺寸设计提供参考。

2 工程概况

某大型水利枢纽工程,主要建筑物为1级建筑物,进水塔底板高程为507.00 m,顶部高程为582.20 m,最大塔高75.2 m,塔宽37.9 m(垂直水流方向),塔长30 m(顺水流方向)。塔体入口处分为5段,每段入口处都有5.0 m×72.7 m(宽×高)的拦污栅墩。在垂直水流方向每个拦污栅墩之间布有横梁做连接,在顺水流方向每个拦污栅墩与进水塔上游胸墙之间布有纵梁做连接,见图1。

3 计算模型

3.1 基本假定

(1)假定塔体单元和地基单元选用不同的材料属性,作为整体研究。

(2)假定塔体和地基的材料均为线弹性,均匀各向同性的连续体。

(3)假定地基为无质量地基,仅考虑其弹性变形。

3.2 有限元模型

3.2.1 计算模型范围 高度方向:向上至塔顶,基础向下取1.5倍塔高,约110 m;

上、下游及左右岸方向:塔上下游及左右岸各取1.5倍塔高,约110 m;

3.2.2 边界条件 基础底面固结,基础四周法向约束,塔体与基础间按连续单元模拟。

3.2.3 计算模型的单元划分 塔体结构网格尺寸控制在1 m以内,塔上连系梁的网格尺寸控制在0.1~1 m,基础网格尺寸控制在5~10 m。

3.2.4 坐标系 计算模型应用的坐标系:垂直水流为X轴方向,向右岸为正;水流方向为Y轴方向,向下游为正;沿高度方向为Z轴方向,向上为正。

塔体和地基均采用solid65实体单元模拟,单元总数188 837个,节点总数95 936个。有限元计算模型如图2、3所示。

3.3 材料力学参数

进水塔主体和回填材料均为C30混凝土,弹性模量为23.0 GPa,混凝土容重为25.0 kN/m^3,泊松比为0.2。进水塔基础岩石属于中度风化岩,弹性模量为3.75 GPa,泊松比μ为0.28。

3.4 计算荷载

计算工况为地震工况(正常使用状态+最大可信地震)。计算荷载:自重+静水压力+扬压力+地震力。

地震力的计算与施加。采用振型分解反应谱法计算,反应谱采用实地测量谱,如图4所示。最大可信地震的地面峰值加速度(PGA)为0.25 g,有效峰值地面加速度为0.1 g。计算地震动水压力时仅考虑动水的惯性作用,采用附加质量[15]模拟。地震动水压力参照EM1110-2-6051通过公式(1)计算,地震动水压力计算示意图如图5所示。

$$m_{ai} = \frac{7}{8}\rho_w \sqrt{H(H-Z_i)}A_i \tag{1}$$

式中:m_{ai}为点i处的动水压力附加质量,kg;H为水深,m;Z_i为点i到坝基的距离,m;A_i为点i处的附属面积,m^2;ρ_w为水的密度,kg/m^3。

4 研究内容

采用反应谱法对进水塔地震工况下拦污栅墩连系梁截面尺寸进行3种方案的计算对比研究。进水塔关键部位如图1所示;为便于研究,3种方案均假定横梁跨度固定为5.5m,纵梁跨度固定为6m;分别计算地震工况条件下,3种设计方案进水塔关键部位的应力、变形及其变化规律。

方案 1:横、纵梁高、宽均为 1 m,进水塔单一设置横(纵)梁。

方案 2:纵梁高与宽均为 1 m;满足基本设计原则,高不小于宽的要求下,横梁的宽、高在 0.6、0.8、1.0 和 1.2 m 4 种尺寸中相互组合分别计算。

方案 3:横梁高与宽均为 1 m;满足基本设计原则,高不小于宽的要求下,纵梁的宽、高在 0.6、0.8、1.0 和 1.2 m 4 种尺寸中相互组合分别计算。

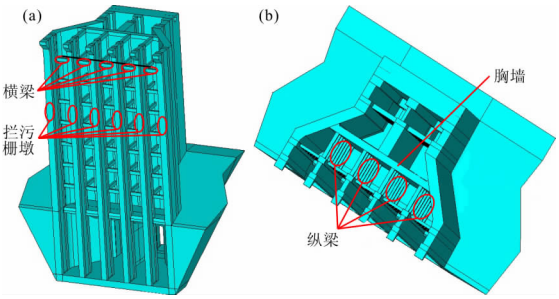


图 1　进水塔关键部位示意图

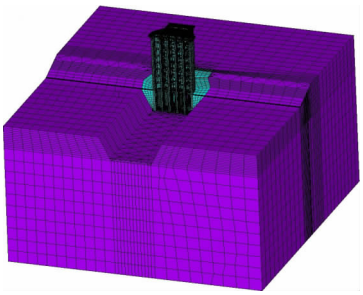


图 2　整体有限元模型

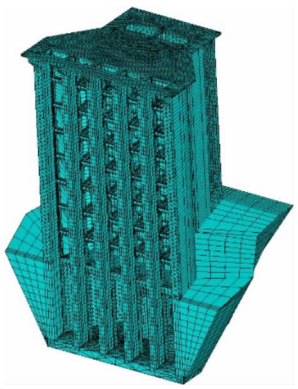


图 3　塔体有限元模型

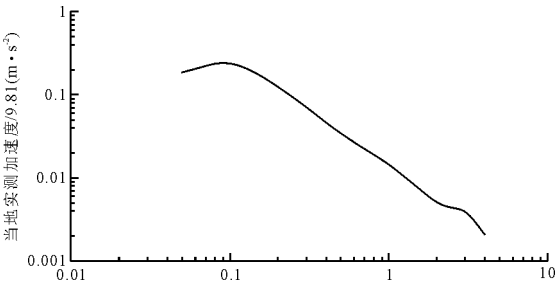


图 4　最大可信地震的谱值

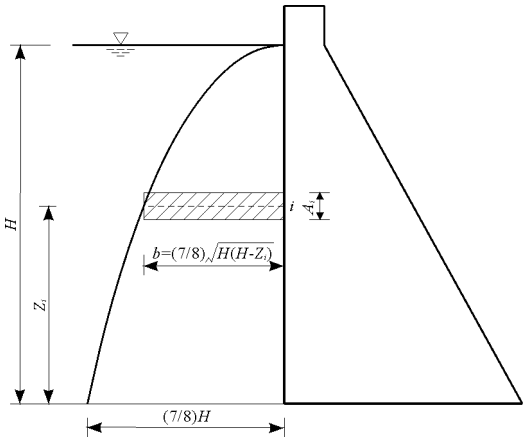


图 5　地震动水压力计算示意图

5　计算结果及分析

5.1　单一设置连系梁对进水塔关键部位的应力及形变影响

方案 1 进水塔关键部位的应力、形变及其变化规律计算结果如表 1 所示。

表 1　仅设置横梁或纵梁对进水塔结构关键部位应力的影响

计算方案	横梁轴向拉应力值/MPa	纵梁轴向拉应力值/MPa	拦污栅墩最大拉应力值/MPa	拦污栅墩 X 向位移/mm	拦污栅墩 Y 向位移/mm
设置横纵梁	11.5	9.0	8.6	13.9	-13.8
仅设置横梁	21.1		10.5	21.2	-11.1
仅设置纵梁		15.9	8.7	23.2	-13.6

由表 1 可知,进水塔单一设置横(纵)梁结构时,该单一横(纵)梁结构比原(横纵梁)结构轴向承受拉应力值分别增大 83.5% 和 76.7%;与其相连接的拦污栅墩,最大拉应力值分别增大 22.1% 和1.2%,总体呈增加趋势;拦污栅墩 X 向位移增大 52.6% 和 66.6%,Y 向位移减小 19.5% 和 1.5%,总位移整体呈增加趋势。计算结果表明,增加纵(横)梁可以有效限制拦污栅墩位移进而减少其(拦污栅墩)对横(纵)梁的拉应力,单一设置横(纵)梁结构时的塔体变形见图 6。

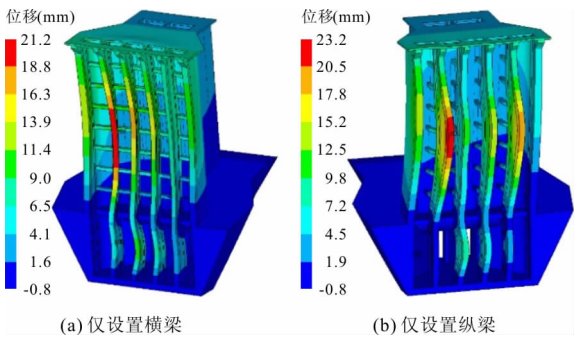


图 6　塔体位移放大图

5.2 改变横梁尺寸对进水塔关键部位的应力及形变影响

方案2进水塔关键部位的应力、形变及变化规律计算结果见表2。

表2 不同尺寸横梁对进水塔结构关键部位应力的影响

横梁高/m	横梁宽/m	横梁轴向最大拉应力/MPa	拦污栅墩最大主拉应力/MPa	拦污栅墩X向位移/mm	拦污栅墩Y向位移/mm	纵梁轴向最大拉应力/MPa
1.2	1.2	9.6	8.8	13.2	-14.0	10.2
1.2	1.0	10.8	8.8	13.3	-13.9	9.4
1.2	0.8	11.4	8.6	14.4	-13.8	8.8
1.2	0.6	12.8	8.8	15.8	-13.6	8.3
1.0	1.0	11.5	8.6	13.9	-13.8	9.0
1.0	0.8	13.2	8.7	15.0	-14.0	8.5
1.0	0.6	14.5	8.7	17.1	-13.7	7.9
0.8	0.8	14.8	8.9	16.3	-13.4	8.3
0.8	0.6	15.9	8.8	17.6	-13.6	7.7
0.6	0.6	16.6	9.0	18.0	-13.5	7.7

结合表2数据，绘制不同截面尺寸横梁对关键部位的应力响应图和位移响应图，如图7~9。以图7为例，分别沿纵坐标刻度线1和横坐标刻度线0.8做延伸线，查询延伸线交点所在位置的颜色对应应力值刻度尺的颜色，即可得到截面尺寸高1 m宽0.8 m的横梁其轴向拉应力的最大值。

由表2与动力响应图7~9可知，随着横梁结构尺寸的增大，其轴向拉应力由16.6 MPa减小到9.6 MPa，减小42.2%，且与其连接的拦污栅墩X向的位移减少26.7%，纵梁轴向的拉应力增加32.5%；由计算结果可以看出，横梁截面面积大，横梁刚度大，横梁对拦污栅墩位移的限制作用强，而地震作用下，横梁截面面积大，横梁质量大，其地震惯性力大，塔体前倾趋势较强，因此塔体纵梁轴向拉应力增大。

5.3 改变纵梁尺寸对进水塔关键部位的应力及形变影响

方案3进水塔关键部位的应力、形变及变化规律计算结果见表3。

整合表3中的数据，绘制不同截面尺寸纵梁对关键部位的应力响应图和位移响应图，如图10~13。

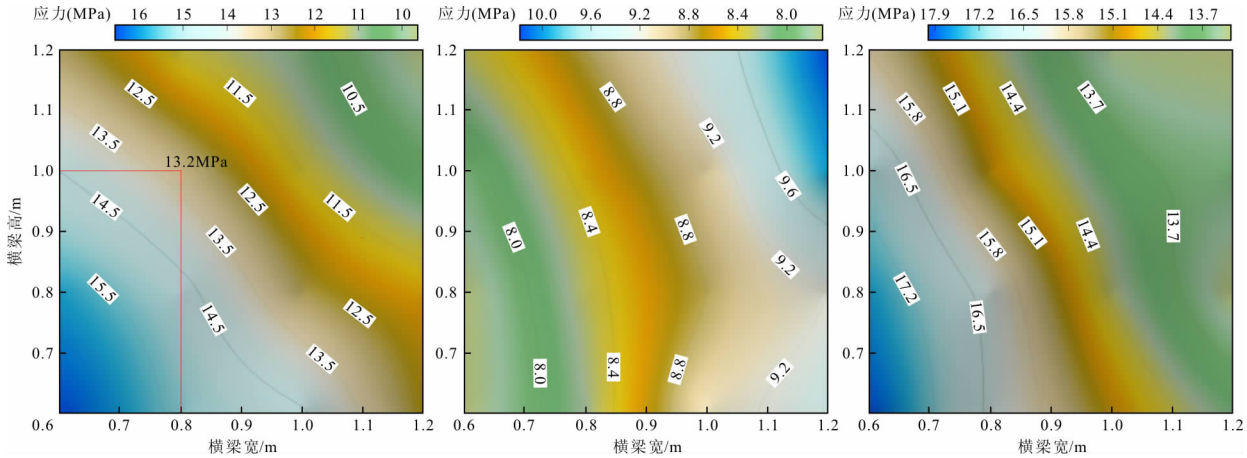


图7 不同截面尺寸横梁对其轴向拉应力的应力响应图

图8 不同截面尺寸横梁对纵梁轴向拉应力的应力响应图

图9 不同截面尺寸横梁对拦污栅墩X向的位移响应图

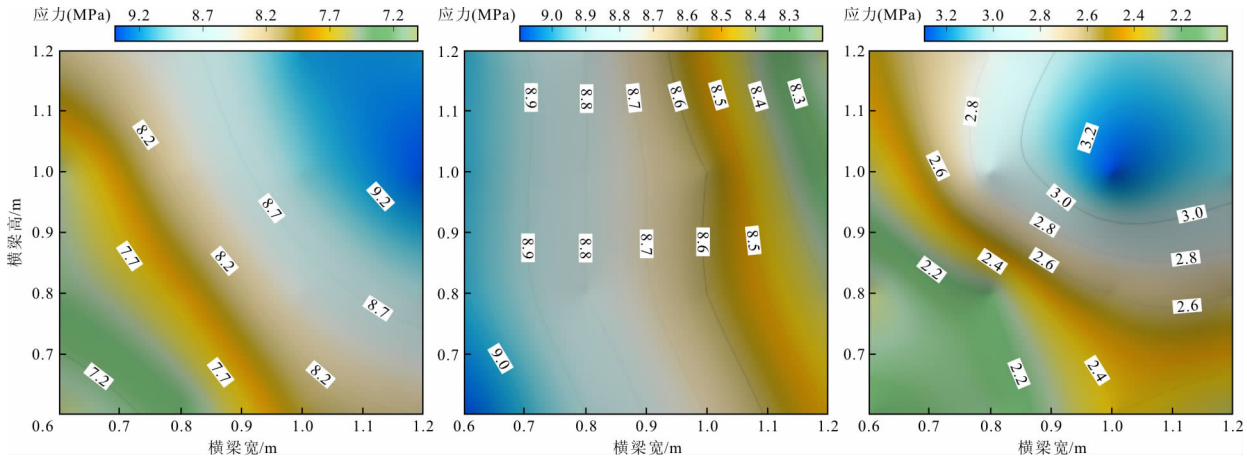


图10 不同截面尺寸纵梁对其轴向拉应力的应力响应图

图11 不同截面尺寸纵梁对拦污栅墩最大主拉应力的应力响应图

图12 不同截面尺寸纵梁对胸墙与纵梁连接部位最大主拉应力等值线图

表 3　不同尺寸纵梁对进水塔结构关键部位应力的影响

纵梁高/m	纵梁宽/m	纵梁轴向最大拉应力/MPa	拦污栅墩最大主拉应力/MPa	拦污栅墩 X 向位移/mm	拦污栅墩 Y 向位移/mm	胸墙与纵梁连接部位最大主拉应力/MPa	横梁轴向最大拉应力/MPa
1.2	1.2	9.2	8.2	14.0	-13.9	3.0	12.2
1.2	1.0	9.2	8.5	13.8	-13.9	3.1	11.8
1.2	0.8	8.6	8.8	13.9	-13.8	2.8	11.5
1.2	0.6	8.2	9.0	14.0	-13.8	2.5	11.5
1.0	1.0	9.0	8.6	13.9	-13.8	3.3	11.5
1.0	0.8	8.3	8.8	13.9	-13.8	2.9	11.5
1.0	0.6	7.5	9.0	14.0	-13.8	2.3	11.6
0.8	0.8	7.8	8.8	14.0	-13.8	2.2	11.6
0.8	0.6	7.4	9.0	14.2	-13.7	2.0	11.7
0.6	0.6	7.0	9.1	14.2	-13.8	2.2	12.6

由表 3 与动力响应图 10 ~ 12 可知,纵梁截面面积增大,其自身轴向的拉应力由 7 MPa 增加到 9.2 MPa,增大 31.4%,与胸墙连接部位的最大主拉应力增大 36.3%,与拦污栅墩连接部位的最大主拉应力减少 9.9%;计算结果表明,纵梁刚度增大,其对拦污栅墩位移的限制作用不明显,纵梁的形变变幅较小,因此纵梁刚度大幅增加,其轴向拉应力反而增大,其与胸墙连接部分的大主拉应力亦增大,而拦污栅墩位移减小,其最大主拉应力减小。

6　结　论

本文采用反应谱法,研究了地震激励下高耸进水塔拦污栅墩连系梁结构尺寸对进水塔关键部位应力和变形的影响,得到以下结论:

(1)横(纵)梁可有效限制拦污栅墩位移,改善连系梁体系应力布局,其中横梁对拦污栅墩位移限制作用较为明显。

(2)改变横梁尺寸可显著改善塔体关键部位的应力和变形,横梁尺寸大,其刚度大,自身轴向拉应力小,拦污栅墩位移小,纵梁的轴向拉应力小幅增加,较大横梁尺寸有利于进水塔的结构稳定。

(3)改变纵梁尺寸对改变塔体关键部位的应力和变形影响较小,但纵梁尺寸大、其刚度大,自身轴向拉应力大,其与胸墙连接部分的第一主拉应力显著增大。因此,较大的纵梁尺寸不仅增加成本,且不利于进水塔的结构稳定。

对于高耸进水塔结构,较大的横梁尺寸有利于减小其轴向拉应力及拦污栅墩的位移,而较大的纵梁尺寸会增大成本且对结构产生不利影响。可见,适当的增加横梁尺寸,减小纵梁尺寸可有效降低成本,改善结构安全。本文研究可为结构相似的进水塔的连系梁尺寸调整提供一定的参考作用。

参考文献:

[1] 林继镛. 水工建筑物:第五版[M]. 北京:中国水利水电出版社,2009.

[2] 李承木. 外掺氧化镁混凝土快速筑坝技术综述[J]. 水利水电科技进展,2013,33(5):82 - 88.

[3] 邓铭江. 严寒地区碾压混凝土筑坝技术及工程实践[J]. 水力发电学报,2016,35(9):111 - 120.

[4] 刘启钊, 胡 明. 水电站:第 4 版[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2010.

[5] 彭翠玲,李声平,吴杰芳,等. 水布垭水电站进水塔结构抗震分析与安全评估[J]. 长江科学院院报,2005(2):50 - 52.

[6] 乐成军,任旭华,邵 勇,等. 水电站进水塔结构抗震设计研究[J]. 水力发电,2009,35(5):86 - 89.

[7] 黄旭东,任旭华,张继勋. 水电站进水塔结构抗震性能评估[J]. 水电能源科学,2012,30(9):85 - 88 + 205.

[8] 韩俊岭,吴建兴. 进水塔拦污栅框架抗震优化设计及有限元数值模拟[J]. 山西建筑,2014,40(29):49 - 50.

[9] 曹征良. 双功能钢筋混凝土连梁的实验研究[D]. 南京:东南大学,1987.

[10] 钞云芳. 高层剪力墙结构连系梁的合理设计[C]// 河南省建筑业行业优秀论文集, 2007.

[11] 张彬彬. 高层建筑剪力墙连系梁抗震性能的试验研究[D]. 重庆:重庆大学,2001.

[12] 宋珊珊. 考虑配筋作用的高耸进水塔结构连系梁破坏过程及改进设计研究[D]. 天津:天津大学,2009.

[13] 岳小吉. 振型分解反应谱法在抗震设计中的应用[J]. 发展,2011(7):120 - 122.

[14] 刘先明,叶继红,李爱群. 多点输入反应谱法的理论研究[J]. 土木工程学报,2005,38(3):17 - 22.

[15] 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.