

高耸进水塔塔后回填高度对其抗震性能的影响

杨光, 李守义, 李浪, 肖阳, 张紫璇, 杨勇
(西安理工大学 水利水电学院, 陕西 西安 710048)

摘要: 针对高耸进水塔塔后回填高度的选取问题,规范未给出通用的取值范围,在计算分析时一般只考虑塔后回填对塔体应力的影响,对塔后回填与基岩交接处的应力涉及较少。在保证进水塔稳定的条件下,采用 ANSYS 有限元分析理论,建立进水塔三维有限元模型,选用反应谱法计算了进水塔在地震作用下的动力响应,对比分析了不同塔后回填高度对进水塔结构自振频率、位移、塔体应力、回填与基岩交接处应力的影响程度。结果表明:塔后回填高度在一定范围内时,塔后回填能够有效提高塔体的自振频率,改善塔体的位移及应力,塔后回填混凝土与基岩交界面处的应力值有小幅度的增大;当塔后回填高度超过一定值时,回填高度的增加对塔体的自振频率、位移、应力的改善逐渐减弱,塔后回填混凝土与基岩交界面处的应力出现突增。综合分析得出此类进水塔合理的回填高度约为 0.64 倍塔高。

关键词: 高耸进水塔; 回填高度; 应力; 位移; 自振频率; 抗震性能

中图分类号:TV732; TV312

文献标识码: A

文章编号: 1672-643X(2019)06-0180-06

Effect of backfill height on seismic performance of high intake tower

YANG Guang, LI Shouyi, LI Lang, XIAO Yang, ZHANG Zixuan, YANG Yong
(Faculty of Water Conservancy and Hydropower, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: The standard does not give a general range the selection of backfill height of high intake tower, the influence of backfill on the stress of tower body is generally considered; however, the stress at the junction of backfill and basement is less involved. In this study, the three-dimensional finite element model of the stable intake tower was established using the ANSYS finite element analysis theory, and the dynamic response of the intake tower under earthquake was calculated using response spectrum method. The natural frequency, displacement, tower stress, and the degree of influence of joint stress at backfill intersection with bedrock were compared and analyzed. The results showed that the backfilling behind the tower can effectively increase the natural frequency of the tower in certain range, and improve the displacement and stress of the tower. The stress value at the interface between backfilling concrete and bedrock increased slightly. When the backfilling height behind the tower exceeded a certain value, the improvement effect of increase of backfilling height on the natural frequencies, displacements and stresses gradually weakened. The stress at the interface between Backfill Concrete and bedrock behind the tower increased sharply. All in all, the reasonable backfill height of this kind of intake tower is about 0.64 times of the tower height.

Key words: high intake tower; backfill height; stress; displacement; natural frequency of the tower; seismic performance

1 研究背景

进水塔常设置于供水与泄水系统首部,其稳定

性直接影响到水库的正常运行^[1-3]。近年来,许多学者就进水塔抗震方面进行了大量研究^[4-11]。进水塔通常在塔体下游侧回填一定量的混凝土,以此增强进水塔的整体稳定性,但对于回填高度的确定,

收稿日期:2019-06-22; 修回日期:2019-08-08

基金项目:国家自然科学基金项目(51579208); 陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2019JQ-577)

作者简介:杨光(1995-),男,江西宜春人,硕士研究生,研究方向为水工结构分析及数值仿真研究。

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

目前没有统一的标准。孔科等^[12]以某大型水电站进水口为例,计算了其结构的主要静力工况,且通过软件二次开发较好地模拟了结构与动水压力之间的相互作用,分析了不同塔后回填混凝土高度进水塔的动力特性,得出当塔后回填高度在0.82~0.95倍塔高范围内时既能改善塔体的动力特征,也能相应的提高经济效益。唐碧华^[13]通过三维有限元方法,对某进水塔就塔后回填高度作敏感性分析,对比分析了各计算模型的位移及应力,得出塔后回填高度在一定范围内时,结构应力有所改善,但当塔后回填高度大于某一定值时,结构应力反而随回填高度的增加而增加。徐东芝等^[14]采用振型分解反应谱法计算进水塔在有无回填两种情况下的静力与动力反应,结果表明塔后回填对塔体具有一定的约束作用,能够减小塔体变形、增强结构的稳定性,对其抗震性能的提升具有重要作用。李峰^[15]采用反应谱法,计算了不同塔后回填高度下的进水塔模型,得出塔后回填对地震工况下塔体的位移与应力有一定程度的改善,但回填高度太高,会增加正常运行时期的拉应力。张岳等^[16]采用反应谱法计算不同塔后回填混凝土高度下进水塔的动力响应,分析了回填高度对进水塔结构变形、应力和自振频率的影响,得出塔体位移随回填高度增加而逐渐减小,塔体的应力呈先减后增的趋势。

上述对进水塔塔后回填高度的研究证明了较为合理的塔后回填高度对其抗震性能的改善具有重要作用,对进水塔结构的抗震设计非常关键,但是其在进行应力分析时只针对塔后回填高度对塔体应力的影响,而对于塔后回填与基岩交界面处的拉应力却未涉及,也未定量给出回填高度的合理值。鉴于此,本文采用反应谱法^[17-19]计算进水塔的动力响应,研究不同塔后回填高度对自振频率、塔体位移、塔体应力、回填与基岩交界面处应力的影响,以得到一个经济合理的回填高度。

2 工程概况

某岸塔式进水塔底板高程1 806.00 m,塔顶高程1 897.00 m,塔高91.00 m,塔体横河向长35.60 m,顺河向长34.60 m,塔体前侧由左至右依次布置有1#~5#拦污栅墩,拦污栅墩之间通过横梁连接,拦污栅墩与进水口上游面通过纵梁连接。塔体下游侧山体开挖成坡比为1:0.3的台阶状,塔后回填混凝土底部高程为1 830.00 m,塔体通过塔后回填混凝土与山体相连,图1为该进水塔整体纵剖面图。

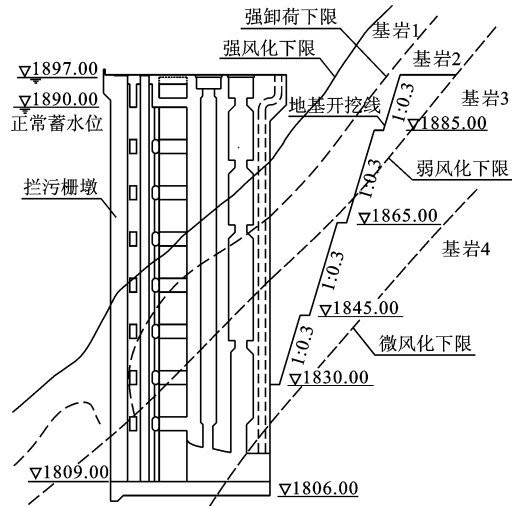


图1 某岸塔式进水塔整体纵剖面

3 三维有限元模型及参数

3.1 计算模型

建立三维有限元计算模型,模型在地基深度方向及下游侧均取100 m,上游侧模拟实际地形。塔体及地基均采用SOLID45单元模拟。图2、3分别为结构计算整体、塔体有限元模型,模型网格主要采用六面体实体单元,进水塔结构网格尺寸为1.0 m,地基网格尺寸由5.0 m逐渐过渡。

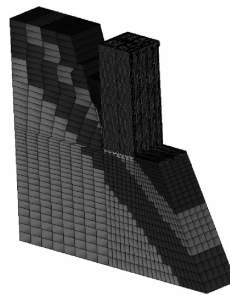


图2 结构整体有限元模型

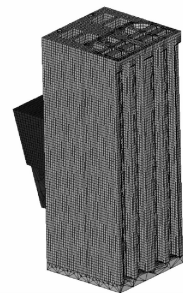


图3 塔体有限元模型

进水塔模型计算坐标:顺河向为X轴,水流方向为正方向;竖直向为Y轴,向上为正方向;横河向塔体右侧为Z轴正方向,进水塔基础上游处(高程1 809.00 m)为坐标系原点。地震反应分析时,动水压力以附加质量的形式模拟。计算边界约束条件:地底部施加三向约束,地基左、右侧面及下游面均施加法向约束;塔体下游侧临空面、上游侧临水面、左右侧临水面均为自由边界。塔后回填与塔体的接触面、混凝土与基岩接触面均考虑为固结状态。采用反应谱法对正常蓄水位(持久状况)、地震工况(偶然状况)下的塔后回填高度进行5种方案的计

算对比研究。为便于研究,5种方案塔后回填的回填宽度与塔体横河向宽度相同,分别计算正常蓄水位、地震工况下,5种设计方案进水塔的自振频率、位移、塔体应力、回填与基岩交接处应力及其变化规律,表1为每种方案塔后回填混凝土高程。

表1 计算模型说明

方案	回填混凝土顶部高程/m	回填净高度/m	塔背接触高度/m	塔背接触高度/总塔高
1	1830.00	0.00	24.00	0.26
2	1845.00	15.00	39.00	0.43
3	1865.00	35.00	59.00	0.64
4	1875.00	45.00	69.00	0.75
5	1885.00	55.00	79.00	0.87

3.2 材料参数

进水塔主体为C30混凝土,回填混凝土为C20混凝土,基础采用无质量刚度基础。C30混凝土材料参数为:弹性模量 $E=30.0$ GPa,泊松比 $\mu=0.167$;C20混凝土材料参数为:弹性模量 $E=25.5$ GPa,泊松比 $\mu=0.167$;地质资料的参数如表2所示。

表2 基岩材料参数表

参数类型	基岩			
	基岩1	基岩2	基岩3	基岩4
弹性模量/GPa	5.5	12.5	15	20
泊松比 μ	0.25	0.25	0.25	0.25
重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	0	0	0	0

3.3 计算工况及荷载

(1)工况1,正常蓄水位(持久状况),正常蓄水位为1890.00 m;

(2)工况2,地震工况(偶然状况),各工况荷载组合见表3。

该进水塔工程按1级建筑物设计,抗震设防类别为甲类,地震基本烈度为Ⅷ度,地震峰值加速度为0.372 g,反应谱放大系数为2.25,场地特征周期为0.20 s。

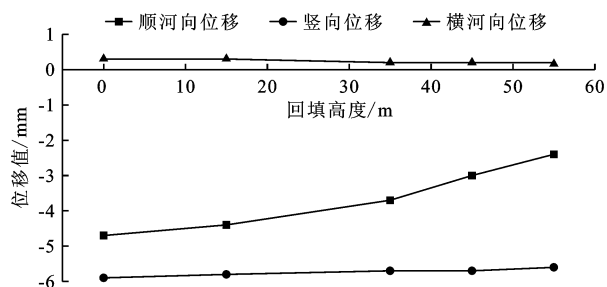


图4 工况1不同回填高度下塔体位移变化曲线

表3 荷载组合

计算工况	自重	静水压力	扬压力	地震力
工况1	√	√	√	
工况2	√	√	√	√

4 结果分析

4.1 塔体自振特性

表4为各方案塔体前10阶自振频率。

表4 同回填高度的结构自振频率 Hz

阶次	方案1	方案2	方案3	方案4	方案5
1	2.1000	2.6311	3.4099	3.7606	3.9014
2	2.1247	2.8549	4.4585	5.4205	5.8958
3	4.3897	5.2535	6.8491	7.4203	7.6325
4	7.2162	7.5256	7.8641	8.1206	8.0180
5	7.4241	7.7354	8.3979	9.3074	9.8186
6	8.5441	9.8822	10.3305	10.5468	10.8926
7	10.8809	11.0006	11.1780	11.3290	11.3688
8	11.1224	11.4689	11.7108	12.0463	12.9012
9	12.7216	13.5784	14.2984	14.8420	15.0949
10	15.0180	15.2035	15.2718	15.4950	15.6533

由表4可看出,塔体自振频率随着回填高度的增加而增大,可见进水塔的整体刚度随着塔后回填高度的增加有所提高。随着回填混凝土的增加,方案2~方案5基频逐次增加的比例为25.29%、29.60%、10.28%、3.74%。从方案2到方案3,其基频增加的幅度较大,是由于进水塔的结构刚度和混凝土结构质量均在增大,但结构刚度变化较混凝土质量变化明显。从方案4到方案5,随着结构刚度的增加,结构混凝土质量也在显著提高,而且与结构刚度相比,混凝土质量变化更为明显,因此基频增加的幅度较小。

4.2 塔体位移反应

图4、5分别为两种工况最大位移随回填高度增加时的变化趋势,表5为塔体各方案的最大位移及其出现的部位。

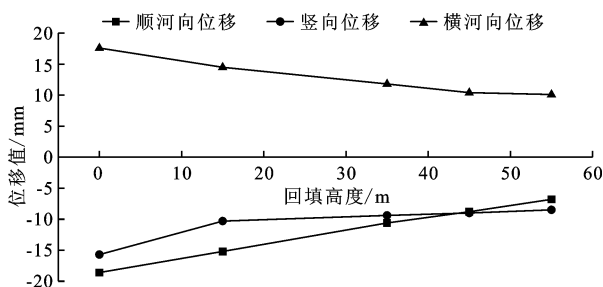


图5 工况2不同回填高度下塔体位移变化曲线

表 5 不同回填高度下塔体最大位移及其出现的位置

工况	计算方案	U_x /mm	部位	U_y /mm	部位	U_z /mm	部位
工 况 1	1	-4.7	塔顶	-5.9	塔顶前沿	0.3	1#拦污栅墩中下部前侧
	2	-4.4	塔顶	-5.8	塔顶前沿	0.3	1#拦污栅墩中下部前侧
	3	-3.7	塔顶	-5.7	塔顶前沿	0.2	1#拦污栅墩中下部前侧
	4	-3.0	塔顶	-5.7	塔顶前沿	0.2	1#拦污栅墩中下部前侧
	5	-2.4	塔顶	-5.6	塔顶前沿	0.2	1#拦污栅墩中下部前侧
工 况 2	1	-18.6	塔顶	-15.7	塔顶前沿	17.6	塔顶左侧前沿
	2	-15.2	塔顶	-10.3	塔顶前沿	14.5	塔顶左侧前沿
	3	-10.6	塔顶	-9.4	塔顶前沿	11.8	塔顶左侧前沿
	4	-8.8	塔顶	-9.0	塔顶前沿	10.4	塔顶左侧前沿
	5	-6.8	塔顶	-8.5	塔顶前沿	10.1	塔顶左侧前沿

由表 5 和图 4 可知,正常蓄水位下,塔体顺河向和竖直向的位移远大于横河向位移。随着回填混凝土高度的增加,其顺河向位移逐次减小值为 0.3、0.7、0.7、0.6 mm;顺竖向位移逐次减小值为 0.1、0.1、0.1 mm;横河向位移逐次减小值为 0、0.1、0、0 mm。各方案下,顺河向最大位移均出现在塔顶,其减小的位移值随回填混凝土高度的增加而增大;竖向位移均出现在塔体前沿,其减小的位移值随回填高度的增加变化不大;横河向位移均出现在 1#拦污栅墩中下部前侧,其减小的位移值随回填高度的增加变化不大。

由表 5 和图 5 可知,地震工况下,随着回填混凝土高度的增加,其顺河向位移逐次减小值为 3.4、4.6、1.8、2.0 mm;顺竖向位移逐次减小值为 5.4、0.9、0.4、0.5 mm;横河向位移逐次减小值为 3.1、2.7、1.4、0.3 mm。各方案下,顺河向最大位移均出现在塔顶,其减小的位移值随回填混凝土高度的增加变化较大;竖向位移均出现在塔体前沿,其位移值减小幅度随回填高度的增加而逐渐变小;横河向位

移均出现在塔顶左侧前沿,其位移值减小幅度随回填高度的增加而逐渐变小。

随着塔后回填高度的增加,塔体的整体刚度有所增加,塔体下游侧所受的水压力有所减小,且基岩对进水塔约束逐渐增加,故正常蓄水位及地震工况下塔体顺河向的位移均逐渐减小;塔体竖向的位移主要由地基的沉降及进水塔结构自重组成,塔后回填高度的增加使得基岩对塔体竖向的约束增强,同时也增大了进水塔结构自重,故正常蓄水位下塔体竖向位移变化不大,地震工况下塔体竖向位移的改善程度也逐渐减弱;基岩对塔体横河向的约束也随塔后回填高度的增加而逐渐增强,由于正常蓄水位下塔体所受荷载在横河向两侧成对称分布,故其横河向的位移几乎没有改变,而地震工况下的位移随约束的增加而逐渐减小。

4.3 塔体应力反映

图 6、7 分别为工况 1、工况 2 进水塔各关键部位主应力极值变化趋势,表 6 为各工况下各方案进水塔关键部位主应力极值及其出现的部位。

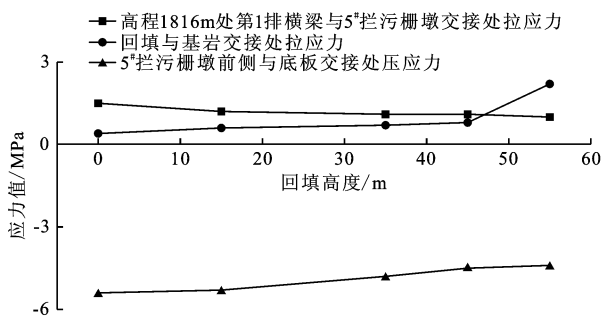


图 6 工况 1 各方案进水塔关键部位主应力极值曲线

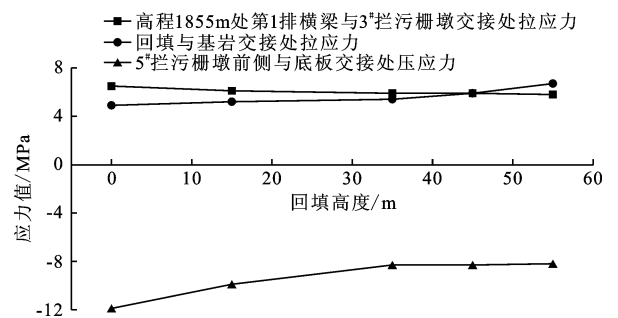


图 7 工况 2 各方案进水塔关键部位主应力变化曲线

表6 各方案塔体的主应力及其出现的部位

工况	计算方案	$\sigma_1 /$ MPa	部位	$\sigma_1 /$ MPa	部位	$\sigma_3 /$ MPa	部位
工况1	1	1.5	高程 1816m 处第 1 排横梁与 5# 拦污栅墩交接处	0.4	回填与基岩交接处	-5.9	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	2	1.2	高程 1816m 处第 1 排横梁与 5# 拦污栅墩交接处	0.6	回填与基岩交接处	-5.3	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	3	1.1	高程 1816m 处第 1 排横梁与 5# 拦污栅墩交接处	0.7	回填与基岩交接处	-4.8	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	4	1.1	高程 1816m 处第 1 排横梁与 5# 拦污栅墩交接处	0.8	回填与基岩交接处	-4.5	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	5	1.0	高程 1816m 处第 1 排横梁与 5# 拦污栅墩交接处	2.2	回填与基岩交接处	-4.4	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
工况2	1	6.5	高程 1855m 处第 1 排横梁与 3# 拦污栅墩右侧交接处	4.9	回填与基岩交接处	-11.9	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	2	6.1	高程 1855m 处第 1 排横梁与 3# 拦污栅墩右侧交接处	5.2	回填与基岩交接处	-9.9	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	3	5.9	高程 1855m 处第 1 排横梁与 3# 拦污栅墩右侧交接处	5.4	回填与基岩交接处	-8.3	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	4	5.9	高程 1855m 处第 1 排横梁与 3# 拦污栅墩右侧交接处	5.9	回填与基岩交接处	-8.3	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处
	5	5.8	高程 1855m 处第 1 排横梁与 3# 拦污栅墩右侧交接处	6.7	回填与基岩交接处	-8.2	5# 拦污栅墩前侧与底板交接处

正常蓄水位下,随着回填混凝土高度的增加,塔后回填对塔体的约束增加,致使进水口与拦污栅墩的相对位移减小,但位移的减小幅度逐渐减弱,故表6和图6中高程1816m处第1排横梁与5#拦污栅墩交接处拉应力逐次减小值为0.3、0.1、0.1MPa。回填与基岩交接处拉应力逐次增加值为0.2、0.1、0.1、1.4MPa;5#拦污栅墩前侧与底板交接处压应力逐次减小值为0.6、0.5、0.3、0.1MPa。随着回填高度的增加,回填对高程1816m处第1排横梁与5#拦污栅墩交接处拉应力及5#拦污栅墩前侧与底板交接处压应力均有改善,但改善程度却逐渐减小。回填与基岩交接处的拉应力值随着回填高度的增加而增大。由表6和图7可知,地震工况下,随着回填混凝土高度的增加,高程1855m处第1排横梁与3#拦污栅墩右侧交接处拉应力逐次减小值为0.4、0.2、0.1MPa;回填与基岩交接处拉应力逐次增加

值为0.3、0.2、0.5、0.8MPa;5#拦污栅墩前侧与底板交接处压应力逐次减小值为2.0、1.6、0、0.1MPa。随着回填高度的增加,塔后回填对高程1855m处第1排横梁与3#拦污栅墩交接处拉应力及5#拦污栅墩前侧与底板交接处压应力有所改善;回填与基岩交接处的拉应力值随之增大。

两种工况下,随着塔后回填高度的增加,进水塔拦污栅墩之间的相对位移逐渐减小,致使拦污栅墩之间横梁上的应力得到了一定程度的改善;而塔后回填高度的增加会引起塔后回填自重的增加,从而使得回填与基岩交接处的竖向应力增大,故回填与基岩交接处的拉应力值随塔后回填高度的增加而增大。混凝土用量随着塔后回填高度的增加而增加,且逐次增加的比例越来越大。随着回填高度的增加,其对横梁上拉应力与塔体的压应力有所改善,改善程度较明显;但当回填混凝土达到一定高度以后,

其改善程度有所减弱;回填与基岩交接处的拉应力随之增大,增幅较小,但当回填混凝土达到一定高度以后,其拉应力增值较大,说明塔后回填高度并非越高越好。

5 结 论

(1)随着塔后回填高度的增加,地震工况下塔体顺河向、竖向、横河向的位移逐渐减小,分布规律也有所改变。塔背接触高度从0.26倍塔高到0.64倍,再到0.87倍,其顺河向的位移分别减少了43%、20%;竖向的位移分别减少了40%、6%;横河向的位移分别减少了33%、10%,其改善程度逐渐减弱。

(2)塔后回填高度对塔体及回填与基岩交接处的应力响应非常明显,塔背接触高度从0.26倍塔高到0.64倍时,塔体主拉应力有明显改善,回填与基岩交接处的主拉应力有较小幅度的增加;塔背接触高度从0.64倍塔高到0.87倍时,塔体主拉应力的改善程度逐渐减弱,回填与基岩交接处的主拉应力出现大幅度的增加。

(3)塔背接触高度为0.64倍塔高与0.75倍塔高的各向位移非常接近,其横梁上的拉应力与5#拦污栅墩前侧与底板交接处压应力也相近。但塔背接触高度为0.64倍塔高时,回填与基岩交接处的拉应力更小,并且回填混凝土用量少,所以基于安全与经济两个要素,本工程塔体回填高度使用0.64倍左右塔高较为合理。如果其他结构与本工程结构相似,可以将本工程回填高度比例作为参考,也可通过相似的分析来确定其安全、经济的塔后回填高度。

参考文献:

- [1] 闫滨,颜宏亮.水工建筑物(第2版)[M].北京:中国水利水电出版社,2018.
- [2] 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.
- [3] 郇能惠,杨泽艳.中国混凝土面板堆石坝的技术进步

- [J].岩土工程学报,2012,34(8):1361-1368.
- [4] 李 骞,李 宁,任 堂,等.高耸进水塔结构在地震作用下的动态响应分析[J].防灾减灾工程学报,2014,34(1):58-66.
- [5] 陈 震,何双华.基于波动理论的进水塔塔背回填高度仿真分析[J].水利水电技术,2012,43(2):35-37+57.
- [6] 张社荣,黄 虎.考虑地震行波效应的大型水电站高耸进水塔群响应分析[J].水利学报,2009,40(9):1120-1126.
- [7] 郑晓东.强震作用下高耸进水塔损伤破坏机理分析[D].西安:西安理工大学,2016.
- [8] 李毅佳,马 斌.水电站进水塔结构分析方案研究[J].中国农村水利水电,2015(7):170-173+175.
- [9] 陈 婧,王 萧.高烈度地震区水电站进水塔抗震分析[J].低温建筑技术,2014,36(9):43-45.
- [10] 李 宁,李 骞,任 堂,等.汶川地震紫坪铺进水塔的动态响应研究[J].地下空间与工程学报,2014,10(5):1127-1134.
- [11] 李子民,李守义,田 超,等.高耸进水塔拦污栅墩连系梁结构体系的抗震分析[J].水资源与水工程学报,2019,30(1):171-175.
- [12] 孔 科,冯桂山,范春竹,等.进水塔背回填高度对其动力学特性的影响[J].武汉大学学报(工学版),2011,44(2):192-196.
- [13] 唐碧华.岸塔式电站进水口塔背回填高度研究[J].水电站设计,2014,30(2):75-77.
- [14] 徐东芝,骆勇军,祁 潇,等.塔背回填对混凝土进水塔结构静动力响应影响分析[J].水电能源科学,2014,32(4):81-83+95.
- [15] 李 锋.塔背回填混凝土对进水塔地震响应的影响分析[J].西北水电,2015(1):85-87.
- [16] 张 岳,李守义,夏 可,等.高耸进水塔结构塔背回填高度抗震研究[J].水利水电技术,2018,49(11):62-67.
- [17] 沈聚敏.抗震工程学[M].北京:中国建筑工业出版社,2015.
- [18] 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.
- [19] 王 伟.反应谱法和时程分析法在高层抗震计算中的对比分析[D].广州:华南理工大学,2012.