

开敞式防洪闸闸室结构抗震安全分析及加固措施研究

郭博文^{1,2}, 范冰^{1,2}, 宋力^{1,2}, 韩玉龙³

(1.黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003; 2.水利部堤防安全与病害防治工程技术研究中心, 河南 郑州 450003; 3.中国电建集团昆明勘测设计研究院有限公司, 云南 昆明 650051)

摘要:以处于地震基本烈度8度区的某开敞式防洪闸为例,基于有限元分析软件,采用时程分析法对闸室结构抗震能力进行了分析。针对闸室上部启闭机房结构存在的抗震缺陷,制定了不同的抗震加固方案,通过不同加固方案抗震能力对比分析,比选了较优加固方案,并在较优方案基础上,探究了连通梁截面尺寸对闸室结构加固效果的内在影响规律。结果表明:地震作用下防洪闸闸室结构启闭机房排架柱折角位置处出现较大拉应力区,其最大拉应力超过了结构承载能力,不满足抗震安全需求;在各排架柱之间增设连通梁可降低启闭机房结构动力响应,但设计过程中为避免启闭机房结构产生鞭梢效应,不宜在顶部位置增设;连通梁截面尺寸对启闭机房排架柱结构抗震能力影响显著,实际工程中可通过控制截面尺寸达到理想的抗震加固效果。

关键词: 闸室结构; 数值模拟; 抗震能力分析; 抗震加固措施

中图分类号: TV691 文献标志码: A doi: 10.3969/j.issn.1000-1379.2024.04.026

引用格式: 郭博文, 范冰, 宋力, 等. 开敞式防洪闸闸室结构抗震安全分析及加固措施研究[J]. 人民黄河, 2024, 46(4): 153-156, 162.

Seismic Safety Analysis and Reinforcement Measures Research of Open Floodgate Chamber Structure

GUO Bowen^{1,2}, FAN Bing^{1,2}, SONG Li^{1,2}, HAN Yulong³

(1. Yellow River Institute of Hydraulic Research, Zhengzhou 450003, China;

2. Research Center on Levee Safety and Disaster Prevention, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China;

3. Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051, China)

Abstract: Taking an open flood control gate located in the VIII degree area of the basic seismic intensity as an example and based on ADINA finite element analysis software, the seismic capacity of the gate chamber structure was analyzed by the time history analysis method. Aiming at the aseismic defects of the upper hoist room structure of the gate chamber, different aseismic reinforcement schemes were formulated. Through the comparison and analysis of the aseismic capacity of different reinforcement schemes, the better reinforcement scheme was selected. On the basis of the better scheme, the internal influence law of the section size on the reinforcement effect of the gate chamber structure was explored. The results show that there is a large tensile stress area at the bent angle of the hoist room bent column of the flood gate chamber structure under the earthquake action, and the maximum tensile stress value exceeds the bearing capacity of the structure, which does not meet the seismic safety requirements. The addition of connecting beams between each bent column can reduce the dynamic response of the hoist room structure, however, it should not be added at the top in the design process to avoid whiplash effect in the hoist room structure. The section size of the connecting beam has a significant influence on the seismic capacity of the bent column structure of the hoist room. In the actual project, the ideal seismic reinforcement effect can be achieved by controlling the section size.

Key words: gate chamber structure; numerical simulation; seismic capacity analysis; seismic reinforcement measures

水闸具有挡水、泄水的双重功能,在水利工程中被广泛应用^[1-3]。我国地震多发,地震频度极高,水闸遭受多次地震灾害结果表明,地震对水闸的破坏较为严重。根据资料统计表明,水闸的主要震害为排架柱断裂、闸墩及翼墙裂缝等^[4-6]。闸室作为水闸工程的咽喉部位,对工程的安全性尤为重要。此外,闸室薄壁结构在强震作用下易发生贯穿性裂缝,尤其针对闸室上部启闭机排架柱结构,其在地震作用下存在明显的“鞭梢效应”,出现贯穿性裂缝的可能性更大。为保证工程在地震作用下安全运行,拟采用有限元模拟技术对开敞式水闸的闸室结构进行抗震能力分析,并针对闸室上部结构进行抗震措施优化设计,以期与同类水

闸工程提供借鉴和参考。

1 抗震能力分析

1.1 有限元模型

某开敞式防洪闸共计6孔,每孔宽度6m,每两孔相邻闸墩间设有伸缩缝,故两孔一联,共计三联。根据

收稿日期: 2023-02-25

基金项目: 黄委优秀青年人才科技项目(HQK-202314); 河南省自然科学基金青年科学基金项目(202300410545); 黄河水利科学研究院科技发展基金项目(黄科发202208)

作者简介: 郭博文(1988—),男,河南鹿邑人,高级工程师,博士,从事水工结构数值模拟研究工作

通信作者: 宋力(1988—),男,河南镇平人,正高级工程师,硕士,从事水工建筑物安全鉴定工作

E-mail: songli@yeah.net

区域地质资料,整个场地主要由新沉积的黏土、淤泥、砂土和砾石组成,在实际施工时,通过换填砂砾料对地基进行了处理,防止地基发生液化破坏。

根据某闸室结构特点,本次选取中间一联进行相关研究,建立了包括地基、闸底板、闸门、闸墩、闸前后水体、交通桥、启闭机房的闸室结构三维有限元模型(见图1)。其中:为减弱地基边界条件对计算结果的影响,以闸底板四周为起点,地基模型向上下游以及左右岸分别延伸2倍闸墩高度;为较为真实地反映地震作用下闸前后动水压力对闸室结构的影响,采用势流体单元模拟闸前后水体;为提高计算精度,均采用六面体网格对模型进行离散,共计120492个节点、94310个单元。

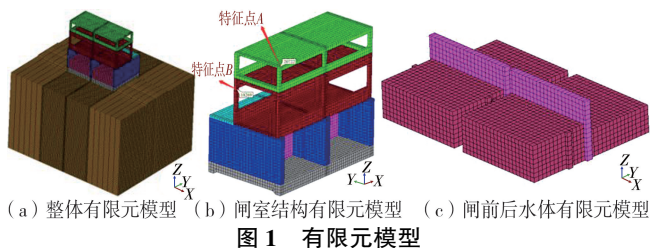


图1 有限元模型

1.2 计算参数

1) 计算工况及荷载。该防洪闸所处区域地震基本烈度为8度,《水工建筑物抗震设计标准》(GB 51247—2018)^[7](以下简称设计标准)规定,一般工程可将场区地震基本烈度作为结构设计烈度。因此,本次计算工况为正常蓄水位运行期加8度地震作用。其中:正常蓄水位运行时防洪闸闸室结构闸前水深2.50 m,闸后水深2.20 m;8度地震作用时地震动峰值加速度为0.20g,地基反应谱特征周期 T_g 取0.35 s。

本次计算中主要考虑模型自重、水荷载、淤沙压力、浪压力、土压力、扬压力、风荷载、启闭机自重及地震荷载等。其中,扬压力由浮托力和渗透压力组成,渗透压力可采用改进阻力系数法计算。

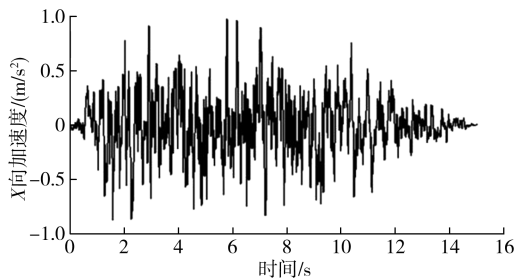
2) 材料参数。有限元数值模拟时,混凝土材料采用线弹性本构模型,同时将等效弹性模量作为混凝土的弹性模量,以体现钢筋的作用。在线弹性阶段,钢筋与混凝土是协调变形的,具体等效原则如下:

$$E_d = E_c + E_s \frac{A_s}{A} \quad (1)$$

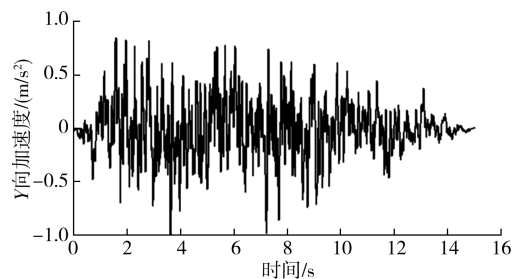
式中: E_d 为钢筋混凝土等效弹性模量, E_c 为素混凝土弹性模量, E_s 为钢筋弹性模量, A_s 为钢筋截面面积, A 为混凝土截面面积。

该工程闸底板、闸墩、交通桥、启闭机房计算所采用的混凝土材料参数(未等效前)为:强度等级C25,容重25.0 kN/m³,弹性模量28.0 GPa,泊松比0.167。

3) 地震荷载。设计标准规定,水闸结构应同时考虑顺河流方向和垂直河流方向的水平向地震作用。本次抗震分析过程中,根据设计标准中的设计反应谱,采用三角级数展开的方法生成两条标准地震加速度时程曲线,见图2。计算过程中,基于封闭振动体系的地震波输入方式,考虑横河向和顺河向地震作用,对闸室结构进行动力响应分析。



(a) X向加速度时程曲线



(b) Y向加速度时程曲线

图2 规范谱人工波加速度时程曲线

4) 动水压力。采用势流体单元模拟闸前、后水体动水压力作用时,其控制方程如下:

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \ddot{P} = 0 \quad (2)$$

式中: ∇^2 为拉普拉斯算子, P 为动水压力, c 为水中声波波速。

同时,在水体和结构之间设置流固耦合边界,以此来模拟水体和结构之间的能量传递,具体如下:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = \rho \dot{V}_n \quad (3)$$

式中: n 为流固耦合面上流体域的外法线方向坐标, ρ 为水的密度, \dot{V}_n 为流固耦合面上沿法向的绝对加速度。

1.3 结果分析

为了便于对计算结果进行分析,在闸室结构上选取2个特征点,具体位置见图1(b)。

1.3.1 位移计算结果分析

以顺河向位移计算结果为例,闸室结构特征点A顺河向位移时程曲线见图3。在地震作用下,特征点A顺河向随地震荷载往复震荡,其中位移最大值(绝对值)为14.10 mm,出现在9.18 s时刻。

1.3.2 应力计算结果分析

闸室结构特征点 B 第一主应力时程曲线见图 4。地震作用下特征点 B 第一主应力在 2.55 s 时刻出现最大值,为 28.24 MPa,位置在启闭机房排架柱折角处。

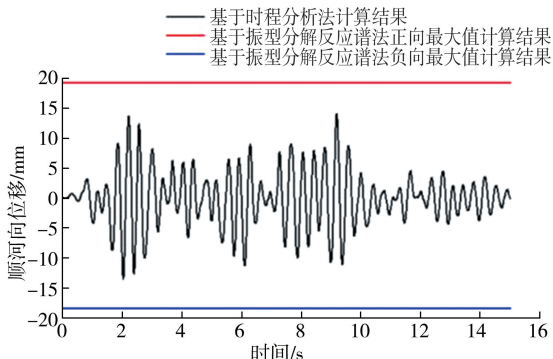


图3 不同方法特征点 A 顺河向位移计算结果对比

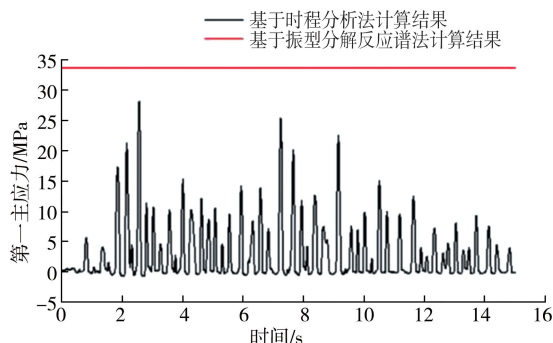


图4 不同方法特征点 B 第一主应力计算结果对比

1.3.3 计算结果合理性分析

为了验证时程分析法计算结果的合理性,将其与基于振型分解反应谱法的计算结果进行对比分析(见图 3、图 4,限于篇幅不再展示计算结果云图)。振型分解反应谱法计算结果较时程分析法计算结果偏大,符合一般规律,两种方法得到的位移及应力最大值出现位置一致,这在一定程度上证明了本次计算结果的合理性。

1.3.4 抗震能力分析

根据排架柱结构截面的配筋,结合文献[8-10]中提出的拉应力复核方法,计算可得单位长度闸墩横截面上最大承载弯矩为 6 444.82 kN·m,闸室的排架柱结构能承受的最大拉应力为 9.87 MPa,远低于 28.24 MPa。因此,闸室启闭机房结构抗震能力不满足安全需求,需要采取相应抗震加固措施。

2 抗震加固措施研究

主要针对启闭机房排架柱结构进行抗震加固措施研究。在不改变现有结构形式基础上,针对闸室上部启闭机房结构特点,考虑增大启闭机房结构整体刚度,拟采用以下 3 种方案进行抗震加固。

1) 方案 1。在闸室上部结构启闭机房二层排架柱

的跨中位置,于顺河方向增加 3 根连通梁,于横河方向增加 4 根连通梁,连通梁的截面尺寸为 25 cm×40 cm(宽×高)。

2) 方案 2。在闸室上部结构启闭机房一层排架柱的跨中位置,于顺河方向增加 3 根连通梁,于横河方向增加 4 根连通梁,连通梁的截面尺寸为 25 cm×40 cm(宽×高)。

3) 方案 3。在闸室上部结构启闭机房一层和二层排架柱的跨中位置,于顺河方向均增加 3 根连通梁,于横河方向均增加 4 根连通梁,连通梁的截面尺寸为 25 cm×40 cm(宽×高)。

2.1 不同方案位移计算结果分析

不同方案闸室上部启闭机房结构特征点 A 顺河向位移时程曲线见图 5。方案 1 特征点 A 顺河向位移最大值(绝对值)为 14.61 mm,出现在 2.53 s 时刻,相较于未加固方案,其最大值增大了 3.62%;方案 2 特征点 A 顺河向位移最大值(绝对值)为 8.71 mm,出现在 2.83 s 时刻,相较于未加固方案,其最大值减小了 38.23%;方案 3 特征点 A 顺河向位移最大值(绝对值)为 7.05 mm,出现在 2.84 s 时刻,相较于未加固方案,其最大值减小了 50%。

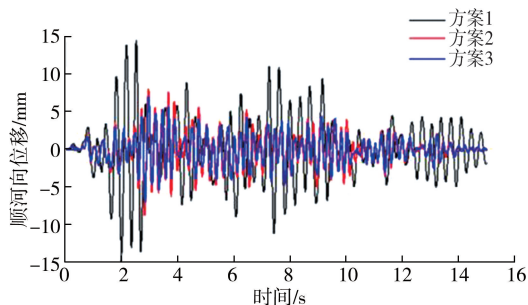


图5 不同方案特征点 A 顺河向位移时程曲线

2.2 不同方案应力计算结果分析

不同方案闸室上部启闭机房结构特征点 B 第一主应力时程曲线见图 6。方案 1 特征点 B 第一主应力在 9.17 s 时刻出现最大值,为 37.40 MPa,相较于未加固方案增大了 32.44%,原因是方案 1 的加固措施使其在地震作用下产生了“鞭梢效应”,增大了启闭机房整体动力响应;方案 2 特征点 B 第一主应力在 3.01 s 时刻出现最大值,为 8.78 MPa,相较于未加固方案减小了 68.91%,方案 2 的加固措施增加了启闭机房一层结构的刚度,加固效果明显;方案 3 特征点 B 第一主应力在 3.01 s 时刻出现最大值,为 8.20 MPa,相较于未加固方案减小了 70.96%。

2.3 不同方案结果对比分析

对比不同方案特征点 A 和特征点 B 动力响应时程曲线可知,方案 2 和方案 3 加固效果明显,特征点 A

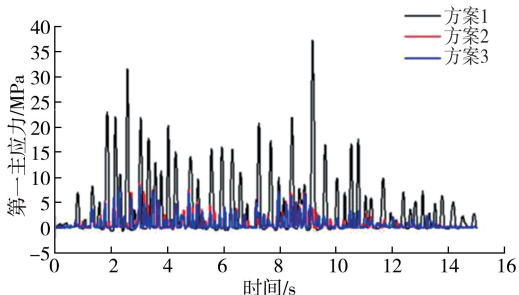


图6 不同方案特征点B第一主应力时程曲线

顺河向位移和特征点B应力响应显著降低。为了更直观体现3种加固方案效果差别,表1给出了不同方案下特征点A位移结果统计。相较于方案2,方案3特征点A顺河向位移和特征点B第一主应力仅降低了19.06%和6.61%。

表1 不同方案特征点A顺河向位移和特征点B第一主应力结果统计

方案	特征点A顺河向位移		特征点B第一主应力	
	最大值/mm	时刻/s	最大值/MPa	时刻/s
未加固	14.10	9.18	28.24	2.55
方案1	14.61	2.53	37.40	9.17
方案2	8.71	2.83	8.78	3.01
方案3	7.05	2.84	8.20	3.01

综上所述,方案1加固措施增加启闭机房二层结构刚度的同时,也增大了启闭机房二层结构质量,同时未改变一层结构刚度,使其在地震作用下产生了“鞭梢效应”,增大了启闭机房整体动力响应;方案2和方案3的加固措施均增大了启闭机房一层结构刚度,显著降低了启闭机房结构整体动力响应。相较于方案2,方案3启闭机房结构整体动力响应降幅偏小,且增大了经济成本。因此,综合考虑推荐方案2抗震加固措施。

3 截面尺寸对抗震加固效果影响

本节在方案2的基础上,增大连通梁的截面尺寸,进一步探讨闸室上部启闭机房结构抗震加固措施的最优方案。增选方案如下:在方案2的基础上,连通梁的截面尺寸增大为25 cm×80 cm(宽×高)。增选方案闸室结构有限元模型见图7。

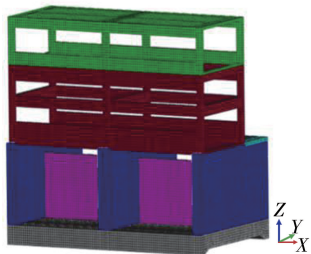


图7 增选方案闸室结构有限元模型

1) 位移计算结果分析。图8给出了增选方案闸室上部启闭机房结构特征点A顺河向位移时程曲线。

特征点A顺河向位移最大值(绝对值)为6.24 mm,出现在4.10 s时刻,相较于方案2减小了28.36%。

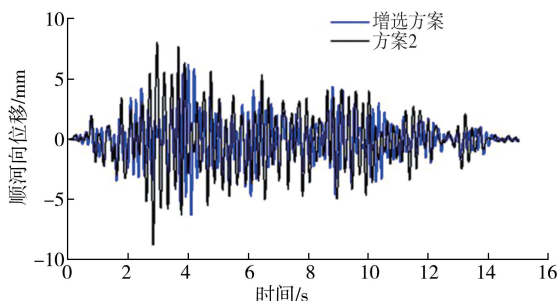


图8 增选方案特征点A顺河向位移时程曲线

2) 应力计算结果分析。图9给出了增选方案闸室上部启闭机房结构特征点B第一主应力时程曲线。增选方案特征点B第一主应力在4.10 s时刻出现最大值,为3.21 MPa,相较于方案2降低了63.44%,加固效果显著。

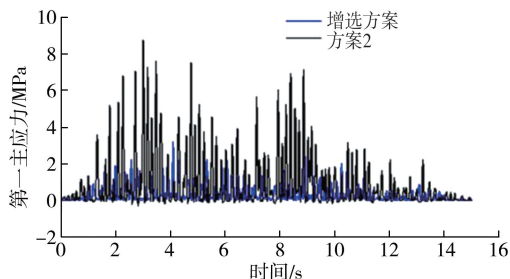


图9 增选方案特征点B第一主应力时程曲线

综上所述,相较于方案2,增选方案进一步降低了启闭机房结构整体动力响应,加固效果显著。实际工程中,可通过控制截面尺寸达到理想的抗震加固效果。

4 结论

针对开敞式闸室上部启闭机房结构存在的抗震缺陷,制定了不同的抗震加固方案,比选了较优加固方案,并在较优方案基础上,探究了截面尺寸对闸室结构加固效果的影响规律。具体结论如下:

1) 在8度地震作用下,防洪闸闸室结构启闭机房排架柱折角位置出现较大拉应力区,最大拉应力超过了结构承载能力,不满足抗震安全需求,需要采取抗震加固措施。

2) 方案2和方案3的加固措施均增大了启闭机房一层结构刚度,显著降低了启闭机房结构整体动力响应,但相较于方案2,方案3启闭机房结构整体动力响应降幅偏小,且增大了经济成本,综合考虑推荐方案2抗震加固措施。

3) 连通梁截面尺寸对启闭机房排架柱结构抗震能力影响显著,实际工程中,可通过控制截面尺寸达到理想的抗震加固效果。

(下转第162页)

工程需求,复合式消能体型则具有较强的适应性。具体结论如下:

1) 1#导流洞出口采取强迫消能坎和第二道消能围坎体型能够满足过流要求,出口水流经强迫消能坎作用形成淹没水跃,水舌大量掺气,主流经水垫剪切作用消耗大量能量,加快了水体流速的衰减,极大提高了消能效率,主流未到达左岸便平稳归槽。第二道消能围坎均匀分散下部水体,横向扩散的水流流速较小,对左岸护坡无冲击,可有效封堵回流。

2) 导流全过程各工况试验结果表明,该复合式出口体型在大小流量下适应性均良好。左岸近岸流速较小,水流平缓,河道内无回流现象,下游河道冲淤情况良好,河床内未出现突出淤积体,左岸护坡处无严重冲坑,因此该体型有效保护了左岸护坡和围堰的安全稳定,整体上满足工程要求。

参考文献:

[1] 肖焕雄. 施工水力学[M]. 北京: 水利电力出版社, 1992: 10.
 [2] 汤宜芹. 安康水电站工程的施工导流设计[J]. 水力发电, 1990, 16(11): 48-51.
 [3] 张超, 雷运华, 张有山, 等. 叶巴滩水电站导流洞布置方案优选研究[J]. 水利水电技术, 2016, 47(10): 15-19.
 [4] 史海英, 于立新, 王重工, 等. 小浪底工程孔板消能泄洪洞的设计优化[J]. 人民黄河, 2000, 22(11): 38-39.
 [5] 张建民. 高坝泄洪消能技术研究进展和展望[J]. 水力发电学报, 2021, 40(3): 1-18.
 [6] 谢省宗, 吴一红, 陈文学. 我国高坝泄洪消能新技术的研究和创新[J]. 水利学报, 2016, 47(3): 324-336.
 [7] 刘文, 邓军, 卫望汝, 等. 岸边溢洪道侧面挑入消力池消能方式研究[J]. 水力发电学报, 2015, 34(4): 111-118.
 [8] 高玉磊, 王伟, 邓军, 等. 高水头泄洪隧洞消能防冲试验研

究[J]. 人民黄河, 2010, 32(10): 148-149.
 [9] 刘昉, 王畅, 何军龄. 基于正交设计的扭曲鼻坎体型优化试验研究[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(1): 166-175.
 [10] 池明阳, 雷声军, 崔进, 等. 枕头坝电站江沟泄洪洞出口消能防冲设计[J]. 人民长江, 2012, 43(14): 36-39.
 [11] 张桂花, 胡士辉, 张晓雷, 等. 一种新型舌瓣鼻坎消能工的应用研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(6): 127-130, 135.
 [12] 刘达, 王均星, 张莹莹. 高水头窄河道多洞联合泄洪模型试验研究[J]. 长江科学院院报, 2014, 31(4): 35-38, 44.
 [13] 余挺, 贺昌林, 张建民, 等. 高水头大流量泄洪洞挑坎体型优化及下游冲淤研究[J]. 四川大学学报(工程科学版), 2007, 39(4): 20-25.
 [14] 吴时强, 王芳芳, 吴修锋, 等. 一种异型反台阶整流消能方法及消力池: CN104775393B[P]. 2017-03-01.
 [15] 卫勇. 导流洞出口消能工的合理体型[J]. 西北水资源与水工程, 2001, 12(1): 44-48.
 [16] 国家能源局. 水电水利工程常规水工模型试验规程: DL/T 5244—2010[S]. 北京: 中国电力出版社, 2010: 10.
 [17] 蒋俏芬. 马岭水利枢纽工程导流与泄洪建筑物体型研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 10.
 [18] 马斌, 李丽, 张宗孝. 导流洞出口段体型优化模型验证研究[J]. 长江科学院院报, 2015, 32(4): 35-39.
 [19] 刘善均, 许唯临, 王伟, 等. 导流洞出口集中布置的优化研究[J]. 四川大学学报(自然科学版), 2003, 40(2): 18-21.
 [20] 吴令凯, 王东. 苏洼龙水电站导流隧洞衬砌混凝土质量控制[J]. 四川水力发电, 2018, 37(6): 100-103, 198.
 [21] 余明辉, 申康, 吴松柏, 等. 水力冲刷过程中塌岸淤床交互影响试验[J]. 水科学进展, 2013, 24(5): 675-682.
 [22] 沈婷, 李国英, 张幸农. 水流冲刷过程中河岸崩塌问题研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(增刊1): 260-263.

【责任编辑 张华岩】

(上接第 156 页)

参考文献:

[1] 朱庆华, 顾美娟. 水闸闸室抗震动力分析及措施[J]. 水电能源科学, 2012, 30(1): 114-116, 208.
 [2] 殷晓曦, 张强. 软弱地基上井字梁底板式水闸的有限元分析[J]. 水利水电技术, 2016, 47(3): 39-41, 46.
 [3] 张宇, 李同春, 齐慧君. 软土地基水闸底板有限元分析的桩基模拟方法[J]. 水利水电技术, 2020, 51(6): 65-71.
 [4] 马利嘉, 蔡尊, 厉丹丹. 基于有限元法的水闸抗震安全评价[J]. 水利水电技术, 2017, 48(3): 30-33, 70.
 [5] 刘长勇. 大型水闸闸室结构抗震加固措施研究[J]. 水利科技与经济, 2022, 28(2): 87-90.
 [6] 邹国华, 周清勇, 万亮亮. 某水闸结构抗震能力分析[J].

广东水利水电, 2021(9): 47-51.
 [7] 中华人民共和国水利部. 水工建筑物抗震设计标准: GB 51247—2018[S]. 北京: 中国计划出版社, 2018: 10.
 [8] 郭博文, 常芳芳, 李娜, 等. 拦河闸闸室结构抗震安全复核研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(增刊1): 19-22.
 [9] 郭博文, 鲁立三, 王荆, 等. 基于有限元法的跌水闸闸室结构抗震安全复核研究[J]. 中国农村水利水电, 2021(7): 155-160.
 [10] 郭博文, 鲁立三, 王荆, 等. 渭河拦河闸闸室抗震安全复核[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2021, 19(5): 1024-1031, 1040.

【责任编辑 张华岩】