

上海某景观闸的动力有限元分析

仇建春^{1,2}, 王星梅³, 倪言波³, 陈健^{1,2}, 曹睿哲^{1,2}

(1. 河海大学 水利水电学院, 南京 210098; 2. 河海大学 水资源高效利用与工程安全国家工程研究中心, 南京 210098; 3. 淮安市水利勘测设计研究院有限公司, 江苏 淮安 223005)

摘要: 对于有着地震威胁的景观闸, 应该进行抗震分析, 有限单元法作为目前工程领域中的一种重要数值模拟方法, 已逐渐作为抗震分析的重要手段。以上海某景观闸工程为例, 采用反应谱法模拟地震响应, 附加质量法模拟地震动水压力, 通过大型有限元软件 ABAQUS 进行有限元数值计算, 分析该水闸闸室段的应力与位移, 验证设计方案的有效性。

关键词: 景观闸; 反应谱; 动力分析; 有限元; 附加质量

中图分类号: TV 698.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)05-0905-05

Dynamic finite element analysis of a landscape sluice in Shanghai

QIU Jian chun^{1,2}, WANG Xing mei³, NI Yarr bo³, CHEN Jian^{1,2}, CAO Rui zhe^{1,2}

(1. College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety,

Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Huai'an Water Conservancy Design Institute, Huai'an 223005, China)

Abstract: Seismic analysis should be carried out for the landscape sluice which has the risk of earthquake. As an important numerical simulation method used in the engineering field, finite element method has been widely used for seismic analysis. In this paper, a landscape sluice in Shanghai was taken as an example. The response spectrum method was adopted to simulate the seismic response, and the additional mass method was adopted to simulate the earthquake dynamic water pressure. Finite element software ABAQUS was used to perform the numerical calculations, to analyze the stress and displacement of the sluice chamber, and to verify the validity.

Key words: landscape sluice; response spectrum; dynamic analysis; finite element method; additional mass

城市景观闸结构性能关系到工程的安全及城市的风貌。地震作为一种对工程有破坏性影响的自然灾害, 对水闸的安全及稳定性有着很大的威胁。统计表明^[1], 水闸的主要震害为底板、护坦、闸墩、消力池等结构的裂缝, 机架桥支架断裂甚至坍塌。

目前, 很难对震害进行定量的计算, 一般通过计算地震惯性力作为定性判断。由于地震是一种复杂多变的振动过程, 地震惯性力的计算非常复杂。目前关于地震荷载的计算理论较多, 反应谱理论作为国内外抗震规范中规定的方法之一, 已受到较广泛的应用。反应谱法^[2]以单质点体系的反应为基础, 对结构进行地震反应的分析, 即基于振型分解, 将结构多质点体系的地震反应, 简化为若干单质点系地震反应的总和^[3-6]。

本文以上海某新型结构的景观闸为例, 采用反应谱法进行动力有限元计算, 研究该新型节制闸的结构特性, 并验证设计方案的抗震性能。

1 数值模拟

1.1 动力反应谱法

应用有限单元法对水闸进行动力分析时, 对于结构受到的载荷, 需考虑单元惯性力及阻尼力。

根据最小势能原理, 整个结构的动力平衡方程为^[7]

$$([M_D] + [M_P])\{\delta\} + [C]\{\dot{\delta}\} + [K]\{\delta\} = -([M_D] + [M_P])\{\delta_g\} \quad (1)$$

式中: $[C]$ 、 $[K]$ 、 $[M_D]$ 分别为结构的整体阻尼矩阵、劲度矩

收稿日期: 2014-11-30 修回日期: 2015-08-21 网络出版时间: 2015-09-24

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150924.2026.004.html>

基金项目: 国家自然科学基金项目(51279052; 51139001; 2014513311); 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室研究项目(20145028312); 江苏省“三三三高层次人才培养工程”科研项目(2016B1307101); 淮安市水利院士工作站资助项目

作者简介: 仇建春(1989-), 男, 江苏扬州人, 博士生, 主要从事水工结构方面研究。E-mail: 121267184@qq.com

阵和集中质量矩阵; $\{\delta'\}$ 、 $\{\delta_j\}$ 、 $\{\delta'\}$ 分别为整体结构的相对速度、相对位移、相对加速度列阵; $[M_p]$ 为附加集中质量矩阵。

振型分解反应谱法作为计算多自由度体系地震作用的一种方法,是在振型分解时程法的基础上推导出的、直接利用标准的设计反应谱,避免了地震加速度选择的困难,它的缺点是不能够应用于非线性振动的情况。

采用的水工抗震设计标准反应谱见图 1。该反应谱是加速度谱,且相应于阻尼比 $\zeta = 0.05$,故当 $\zeta \neq 0.05$ 时,由该反应谱得出的设计反应谱 β 应按下式换算:

$$\beta = \frac{\beta_0}{4 \sqrt{\frac{\zeta}{0.05}}} \quad (2)$$

式中: β_0 为相应于 $\zeta = 0.05$ 时的标准值; β 为其它阻尼比 ζ 对应的设计反应谱。

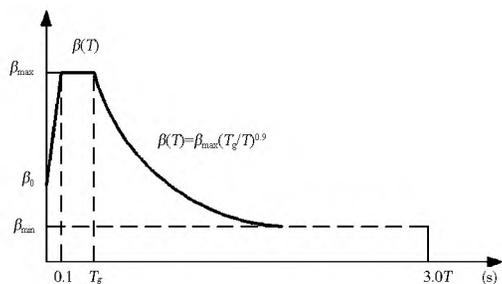


图 1 水工建筑物抗震设计反应谱

Fig. 1 Seismic design response spectra of hydraulic structure

在应用反应谱法对结构物求解地震反应时,首先计算得出结构的若干个低阶振型和周期,然后根据计算出的周期并联合使用设计反应谱图求出各振型对应的设计反应谱值,最后进而求解得出结构各振型的最大加速度向量、最大荷载向量、最大位移向量和最大应力向量。

1.2 附加质量法

当地震发生时,结构因此发生运动,考虑到水体质量及

运动的作用,作用在结构上的水压力因此发生变化,这种变化的水压力即为地震动水压力。进行动力模型分析时,需要着重解决水体与结构的动力相互作用的问题。附加质量模型是将水体简化为与闸室一起运动的附加质量,近似模拟水体的作用,求解规模小^[8]。

附加质量法首先由 Westergaard H. M 提出,其计算结构自振特性时闸体侧单位面积水的附加质量可以按式(3)计算^[9-12]:

$$M_w(z) = 7\eta\rho \sqrt{hz} / (8g) \quad (3)$$

式中: $M_w(z)$ 为水深处的附加质量; z 为计算点至水平面的垂直向距离; h 为闸内水深; ρ 为水的密度; η 为折减系数。

1.3 工程概况

某水闸位于上海市内,是集防洪、挡潮、引水及排水与一体的节制闸,属于软土地基,工程场地土层物理力学参数见表 1。该工程的景观要求较高,闸门开启时要求不外露,因此选择翻转式弧形门作为水闸的工作闸门,门宽 22.0 m,高 8.62 m。闸室底板设计成闸门运行轨迹的圆弧形,其两侧采用 1:3 坡率与上下消力池底顺接,两侧闸墩均设有 3.0 m 的空箱,闸室顺水流方向剖面图及横河向剖面图分别见图 2 和图 3,图中所示标注为高程。该水闸布置成 C30 钢筋混凝土墩式结构,闸室顺河向长为 30.0 m,闸底板总宽为 34.4 m,桩基础为 PHC 桩。此外,为减小渗流对闸室结构的影响,在闸室底板上、下游齿墙处设一道钢筋混凝土板桩防渗墙,侧向防渗由下游翼墙及其基础防渗板桩承担。而该建筑场地属 0 类场地,属于对建筑抗震不利地段,抗震设防烈度按 7 度考虑,设计基本地震加速度为 0.10 g,计算工况为外河水位为 6.14 m,内河水位为 2.50 m。

为保证闸室及翼墙的稳定,闸室段及翼墙下打入桩基。闸室、翼墙、钻孔灌注桩结构采用 C30 混凝土,PHC 预制管桩采用 C80 混凝土,其力学参数指标见表 2。

表 1 地基各土层物理力学参数统计

Tab. 1 Statistics of the physical and mechanical properties of soil

土层号	土层描述	比重 G_s	天然湿密度 ρ /($g \cdot cm^3$)	浮密度 ρ' /($g \cdot cm^3$)	天然孔隙比 e	固结快剪		压缩模量 E_{s1-2} /MPa	弹性模量 [R]/MPa
						黏聚力 c /kPa	内摩擦角 φ ($^\circ$)		
1	杂填土	2.73	1.84	0.99	0.926	18	20	4.98	9.96
0	砂质粉土	2.70	1.86	1.49	0.824	5	31	9.96	12.95
»	淤泥质粉质黏土	2.73	1.75	1.34	1.153	12	18.5	3.28	4.92
¼	淤泥质黏土	2.74	1.67	1.29	1.399	10	11.5	2.17	4.34
½ 1	黏土	2.74	1.73	1.52	1.195	12	12.5	3.04	6.08
½ 1 2	粉质黏土夹薄层粉质黏土	2.73	1.79	1.52	1.015	15	19	4.35	10.875
½ 3 1	粉质黏土夹黏质粉土	2.73	1.78	1.58	1.017	14	19	4.74	11.85
½ 3 2	粉质黏土	2.73	1.79	1.54	1.004	15	19.5	4.84	12.1

1.4 模型简介

本文采用有限元软件 ABAQUS 进行数值模拟,模型自闸室向左右岸延伸 1.5 倍闸室宽,自上下游翼墙端点向上、下游延伸 1.5 倍闸室宽,自桩基底部向下延伸 1.0 倍闸室宽。由于闸室段及翼墙下部打入大量桩基,且为准确把握闸室结构各部位的变形及应力状况,模型剖分较密集,模型共由 1 008 839 个节点组成。采用 C3D8 单元进行数值模拟,单

元数共 959 141 个,不考虑桩与土之间的摩擦,按共节点考虑。水体与闸室结构的附加质量单元通过 ABAQUS 附属子程序实现。图 4、图 5、图 6 分别为整体模型图、闸室段模拟图及翼墙段模拟图。模型四周边界施加水平方向约束,底部施加固定约束^[13-15]。

从水闸结构受力的实际情况来看,它一方面承受静力荷载作用,又承受动力荷载作用。因此,需先完成静力计算,加

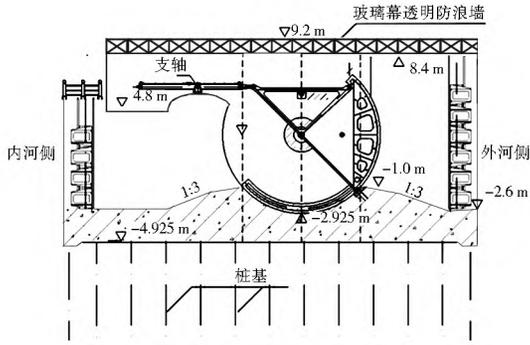


图2 闸室纵剖面图

Fig. 2 Longitudinal section of sluice chamber

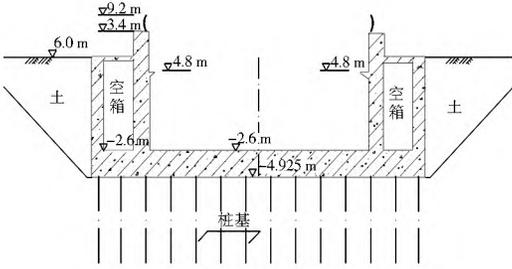


图3 闸室某横剖面图

Fig. 3 Transverse section of sluice chamber

表2 混凝土力学参数统计

Tab. 2 Statistics of the physical and mechanical properties of concrete

构件	材料	容重 /($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	弹性模量 /GPa	泊松比
水闸闸室及翼墙	C30	2 400	30	0.2
PHC 预制管桩	C80	2 492	43	0.15
钻孔灌注桩	C30	2 400	30	0.2

上动力作用下的结构响应,从而求解结构的静动组合反应。静力作用下荷载有整体结构的自重,闸室底板结构下的扬压力通过在底板上施加水荷载模拟,其零水头面方程与上、下游水位相同;闸室边墩外侧的地下水位零水头面呈直线下降,侧向水压力零水头面分别于上、下游水位齐平;作用在闸门上的水压力由支铰承受,通过整体计算后平分至两支铰处。在计算地震对结构的动力响应时,考虑顺河向及横河向的地震作用,通过参照《水工建筑抗震设计规范》中规定取三阶振型进行计算。此外设计反应谱中的 β_{max} 取为2.25,由于建筑类别为0类场地,则特征周期 T_g 取为0.65。

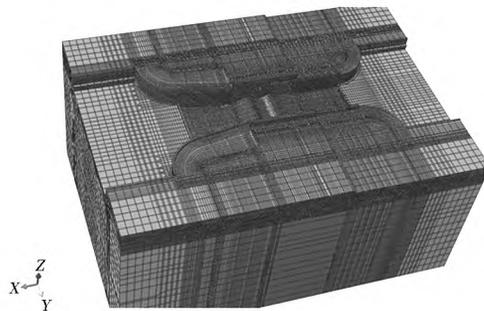


图4 整体模型

Fig. 4 The whole model

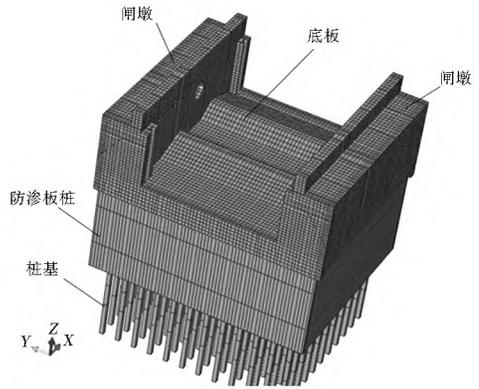


图5 闸室及桩基模拟

Fig. 5 Simulation of sluice chamber and pile foundation

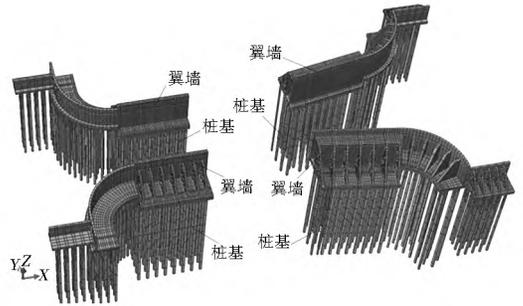


图6 翼墙及其桩基模拟

Fig. 6 Simulation of wing wall and pile foundation

2 结果分析

根据以上计算方法与数值模型,展开有限元动力计算,求得前3阶振型。表3给出了闸室结构的第1阶至第3阶振型相应的频率与周期。

表3 闸室结构自振频率及周期

Tab. 3 Natural frequency and period of sluice chamber

阶数	1	2	3
频率/Hz	1.055	1.254	1.350
周期/s	0.948	0.797	0.741

图7与图8分别为闸室段顺河向动位移及横河向动位移,图9为闸室段顺河向静动组合位移。可以发现闸室段顺河向动位移及横河向动位移最大处均处于闸墩上部,最大值分别达到4.36 cm、4.04 cm,随着高程的降低,闸室段动位移逐渐减小,这符合地震动力响应的规律。比较闸室段顺河向动位移及顺河向静动组合位移后发现,动位移在静动组合位移中比例很大,对于地震监测,应尤其注意位移量的监测。

将静力计算结果与动力计算结果叠加后得到结构的静动组合反应。图10、图11、图12分别为闸室段顺河向总应力图、横河向总应力图、竖直向总应力图,均为对应的静动组合计算结果;图13为闸室段横河向静力计算应力图。可以发现闸室段横河向应力最大可达到1.98 MPa,而对应静力计算最大应力为1.86 MPa,最大应力均位于底板上部突出弯段,这主要由于该部位的顺河向刚度较小。而静力计算结果占主要部分,则说明这是由于两侧较大的闸墩自重与侧向水土压力所致,该部位应尤其注意结构的加强。另外闸墩及

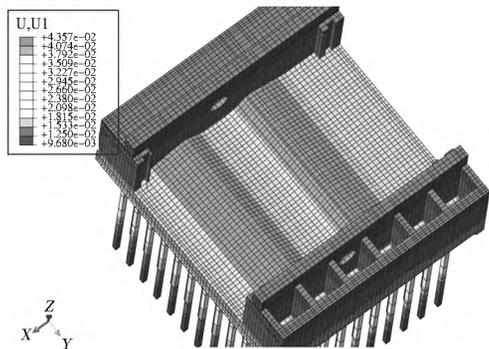


图 7 闸室段顺河向动位移(单位:m)

Fig. 7 The dynamic displacement of sluice chamber along the river (unit: m)

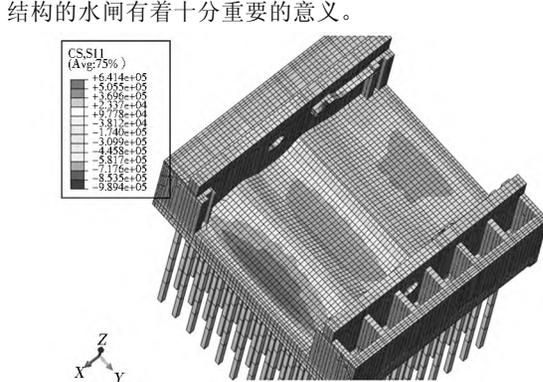


图 10 闸室段顺河向总应力(单位:m)

Fig. 10 The total stress of sluice chamber along the river (unit: Pa)

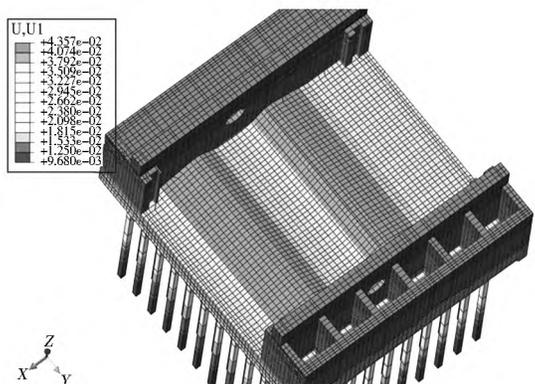


图 8 闸室段横河向动位移(单位:m)

Fig. 8 The dynamic displacement of sluice chamber perpendicular to the river (unit: m)

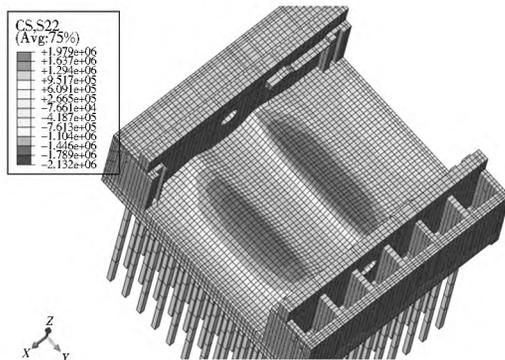


图 11 闸室段横河向总应力(单位:m)

Fig. 11 The total stress of sluice chamber perpendicular to the river (unit: Pa)

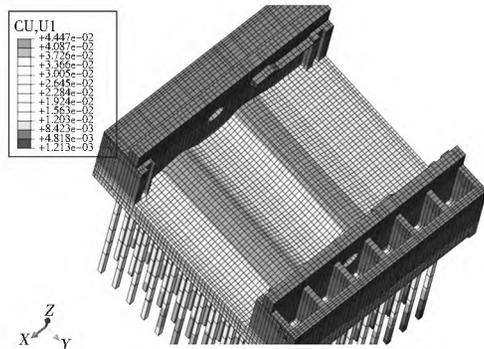


图 9 闸室段顺河向静动组合位移(单位:m)

Fig. 9 The combined static and dynamic displacement of sluice chamber along the river (unit: m)

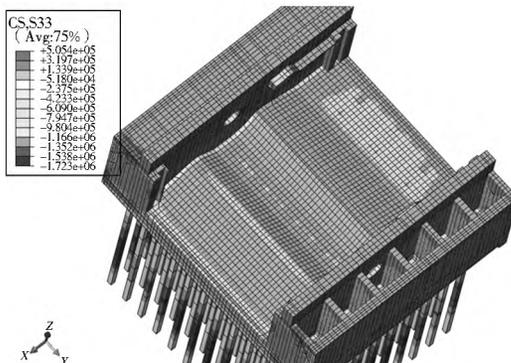


图 12 闸室段竖直向总应力(单位:m)

Fig. 12 Vertical total stress of sluice chamber (unit: Pa)

桩基受力情况较好, 闸墩空箱内应力均较小, 应力状况处于安全状态。

3 结语

本文应用反应谱法对上海某景观闸进行动力有限元分析, 对于水与闸室的相互作用, 编译 ABAQUS 子程序采用附加质量法进行模拟, 通过研究分析闸室段位移及应力, 发现桩基受力情况较好, 闸墩空箱内应力均较小, 应力状况处于安全状态。闸室段动位移随着高程的降低而逐渐降低, 动位移在整体位移中所占比例很大。此外, 底板上部突出段横河向应力较大, 该处应予以结构加强。闸室段应力状态整体较好, 验证了设计方案在地震工况下的有效性, 对于推广同类

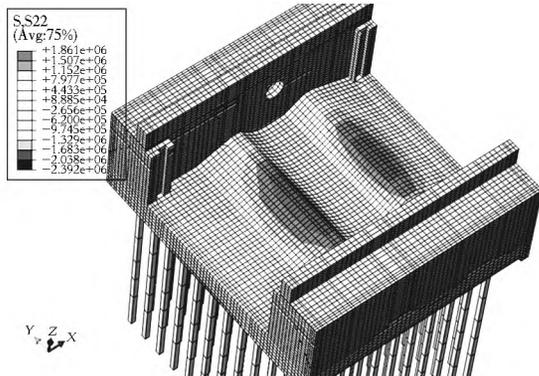


图 13 闸室段竖直向静力计算应力(单位:m)

Fig. 13 Vertical stress of sluice chamber using static calculation (unit: Pa)

参考文献(References):

- [1] 王云. 考虑地震影响的水闸仿真分析[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2011. (WANG Yun, Seismic resistance analysis of sluice[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2011. (in Chinese))
- [2] 贾冬. 厚覆盖层上的水闸三维有限元静力分析和动力响应分析研究[D]. 南京: 河海大学, 2015. (JIA Dong, Static and dynamic analysis of the sluice of Jin Ping Cascade 2 Hydroelectric Power station Sluice was studied using the finite element method[D]. Nanjing: Hohai University, 2005. (in Chinese))
- [3] 张树林. 某框剪结构动力特性测试及地震反应分析[D]. 北京: 中国地震局地震研究所, 2013. (ZHANG Shulin, Analysis of dynamic characteristics and seismic response of frame shearwall building[D]. Beijing: Institute of seismology, 2013. (in Chinese))
- [4] 胡月伟. 基于反应谱的斜拉桥动力特性及地震响应的有限元分析[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011. (HU Yuewei, Based on response spectrum finite element analysis of dynamic characteristics and seismic response for cable stayed bridge[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011. (in Chinese))
- [5] 邓小山. 高耸升船机结构三维有限元动力分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2011.(DENG Xiaoshan, Three dimension finite element structure dynamic analysis of tall ship lifted building[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2011. (in Chinese))
- [6] 王元清. 超高层钢结构建筑动力特性与抗震性能的有限元分析[J]. 土木工程学报, 2006(5): 65-71. (WANG Yuanqing, Finite element analysis on dynamic characteristics and seismic resistance of super high rise steel structures[J]. China civil Engineering journal, 2006(5): 65-71. (in chinese))
- [7] 张海龙. 影堂水闸结构的静动力计算分析[D]. 郑州: 郑州大学, 2013. (ZHANG Hairong, Static and dynamic calculation and analysis of structure on yingtang sluice[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2013. (in chinese))
- [8] 徐磊. 基于 ABAQUS 的四节点三维附加质量单元开发[J]. 水电能源科学, 2011(6): 100-102. (XU Lei, Development of four Nodes 3-D added mass element in ABAQUS[J]. Water Resources and Power. 2011(6): 100-102. (in Chinese))
- [9] 龚亚琦. 坝体—地基—库水体系的动力有限元分析及其应用[J]. 水电能源科学, 2012(1): 40-44. (GONG Yaqi, Dynamic XFEM analysis of dam boundary reservoir system and its application[J]. Water resources and power, 2012(1): 40-44. (in Chinese))
- [10] 宋波, 刘浩鹏, 张国明. 基于附加质量法的桥墩地震动水压力分析与实例研究[J]. 土木工程学报, 2010(S1): 102-107. (SONG Bo, LIU Haopeng, ZHANG Guoming, Analysis and case study of earthquake induced hydrodynamic pressure deep water bridge based on added mass approach[J]. China Civil Engineering journal, 2010(S1): 102-107. (in Chinese))
- [11] 关淑萍. 基于 ANSYS 的水闸动力特性及内力分析方法研究[D]. 南京: 河海大学, 2006. (GUAN Shuping, The study of dynamic characteristic of sluice and internal force analysis method basing on Ansys[D]. Nanjing: Hohai University, 2006. (in Chinese))
- [12] 周艳秋. 舰船夹层结构动力响应特性分析[D]. 大连: 大连理工大学, 2005. (ZHOU Yanqiu, Response analysis for sandwich plate structure[D]. Dalian: Dalian University of University, 2005. (in Chinese))
- [13] 仇建春. 双排格形地下连续墙的空间变形三维有限元分析[J]. 水利水电技术, 2014(8): 78-82. (QIU Jianchun, 3-D finite element analysis on spatial deformation of double row cellular continuous diaphragm Wall[J]. Water Resources And Hydropower Engineering. 2014(8): 78-82. (in Chinese))
- [14] 曹邱林, 孟怡凯. 微桩群复合地基水闸闸室结构有限元分析[J]. 人民长江, 2013(4): 31-34+47. (CAO Qulin, MENG Yikai, FEM analysis on sluice structure with composite foundation of micropiles[J]. Yangtze River, 2013(4): 31-34+37. (in Chinese))
- [15] 张媛媛, 金秀华, 季永兴. 苏州河口口水闸边墩支承压座三维有限元分析[J]. 水利水电科技进展, 2007(S1): 25-28. (ZHANG Yuan yuan, JIN Xiuhua, JI Yongxing, 3-D finite element analysis on abutment pier clamping support of Suzhou River bayou[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources. 2007(S1): 25-28. (in Chinese))