

船闸闸室-地基相互作用体系地震动力特性三维数值分析

崔春义^{1,2}, 孟 坤¹, 程学磊¹, 杨 刚¹, 夏明星¹

(1. 大连海事大学土木工程系, 辽宁 大连 116026; 2. 北京工业大学建筑工程学院, 北京 100124)

摘要 目的 研究船闸闸室体系动力受力变形特性, 分析其地震作用下船闸闸室结构-地基相互作用体系的动力响应特性, 评价其抗震性能。方法 采用子空间迭代法提取船闸闸室体系自然频率与振型, 采用考虑几何非线性的 Newmark 隐式积分法求解船闸闸室动力体系方程, 针对横向和竖向地震力作用下船闸闸室相互作用体系分别进行振型分解反应谱和动力时程分析。结果 3 组水平地震波作用下, 船闸闸室体系闸墙横向水平位移最大幅值为 42.5 mm, 最大拉应力为 1.39 MPa。结论 船闸闸室体系弹性动力时程分析与地震反应谱计算结果幅值水平相近, 地震反应谱分析及进一步动力时程分析, 船闸结构满足抗震规范要求。

关键词 船闸闸室; 反应谱分析; 时程分析; 数值计算; 抗震性能

中图分类号 TU473 文献标志码 A

3-D Numerical Analysis of Dynamic Response of Lock Chamber System

CUI Chunyi^{1,2}, MENG Kun¹, CHENG Xuelei¹, YANG Gang¹, XIA Mingxing¹

(1. Department of Civil Engineering, Dalian Maritime University, Dalian, China, 116026; 2. School of Civil Engineering, Beijing University of Technology, Beijing, China, 100124)

Abstract: In order to discuss the dynamic deformation characteristics and evaluate the seismic performance and dynamic response of interaction system including lock chamber-soil foundation, both response spectrum and time-history analyses of chamber lock interaction system subjected to horizontal and vertical seismic action are conducted respectively by using subspace iteration method to obtain natural frequencies and modes, and solving dynamic equations by Newmark's implicit method with considering geometric nonlinearity based on the computational FEM model. The numerical results show that the maximum horizontal displacement of lock chamber and the maximum tensional stress are 42.5 mm and 1.39 MPa respectively. It can be concluded that the results from response spectrum and step-by-step integration methods accord with each other well and meet the re-

收稿日期:2016-06-23

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51578100);中央高校基本科研业务费项目(3132014326, 3132016216)

作者简介:崔春义(1978—),男,副教授,博士后,主要从事岩土工程数值计算方法研究。

quirements of the seismic code.

Key words: lock chamber; response spectrum analysis; time-history analysis; numerical computation; seismic performance

航道中的船闸建筑物是船舶航行通过的咽喉,对于上下游船舶能否安全畅通具有关键枢纽作用. 2007年,国家发改委和交通部联合编制发布了《全国港航布局规划》方案,这标志着我国已进入交通运输建设飞速发展的黄金时期. 而船闸结构物作为航运开发中重要的水工建筑物之一,其强度变形和稳定性直接关系到通航的正常运行和安全^[1-5]. 近些年来,国内外学者对船闸体系进行了诸多研究. 杨斌等^[6]对嘉陵江新政船闸下闸首结构进行三维非线性有限元分析,考虑材料的弹塑性,应用D-P准则模拟土体,对结构不同工况下的受力特性进行比较分析. 潘宣何等^[7]采用有限元数值方法,系统分析了船闸在检修工况及高运行工况时,基坑开挖对临近船闸闸室墙位移、墙后土压力以及地基反力等变化规律. 卜丁^[8]采用ABAQUS有限元程序建立了船闸主体结构与周围土体相互作用体系三维数值模型,并进行不同荷载组合作用下船闸结构受力变形分析. 陈敏等^[9-10]针对沱新河北船闸的工程实例,通过有限元程序MSC.MARC对船闸上下闸首及闸室建立三维有限元模型,考虑船闸在运行期中各种工况对船闸结构应力进行受力变形分析,并进一步对船闸的工作性态进行了整体评价. 因闸室闸墙在地震作用下承受垂直和水平荷载作用,而闸墙过高易增加两种荷载对结构产生的组合效应,使其在地震作用下极易破坏^[11-15],因此地震力作用下船闸等水工构筑物的动力响应特性研究一直以来受到学术界和工程界的重视. 张涛^[16]采用ANSYS有限元软件建立安谷船闸结构三维数值模型,通过模态分析研究其自振特性,并采用反应谱分析和时程分析法得到多遇地震作用下闸室结构动力响应规律. KONTIOE S

等^[17]基于船闸-场地二维平面应变模型进行了有限元数值分析,强调了考虑地基相互作用在分析船闸结构-场地地基体系动力分析中的重要性. Lyudmila Y F等^[18]采用动力测试方法对船闸结构动力参数进行测定,并对船闸整体动力固有特性进行了较为系统评价. 由于动力问题求解复杂性和以往计算硬件及理论局限,已有的国内外研究成果大多只对体系进行静力分析,而不考虑地基相互作用影响或二维动力分析模型亦无法真实有效地模拟船闸闸室结构地震作用下的动力响应. 笔者基于已有国内外研究成果,考虑结构-地基相互作用的影响,以四川凤仪场船闸为具体工程背景,利用大型通用有限元数值平台ADINA建立船闸闸室-场地地基相互作用体系三维动力数值分析模型,分析其地震作用下船闸闸室结构-地基相互作用体系的动力响应特性,为船闸结构抗震设计与工程实践提供参考.

1 工程概况与数值模型

笔者选取四川凤仪场船闸为具体工程背景,所选取船闸闸室属于整体式闸室结构,闸墙和底板刚性连接,闸室左右两侧均采用砂卵石回填至设计标高. 船闸闸室结构剖面图如图1所示. 基于大型有限元数值平台ADINA所建立的三维船闸闸室-地基相互作用动力数值模型如图2所示.

数值模型基于笛卡尔直角坐标系建模,坐标系取船闸闸室顶与船闸闸室轴线交点为原点,船闸闸室在纵向上截取了纵向相邻收缩缝之间距离20m,宽度方向以船闸闸室的轴线为中心线,左右两侧分别取60m,深度方向则以船闸闸室的顶部起向下取70m,基岩高度54m. 船闸闸室的闸墙及底板均为钢

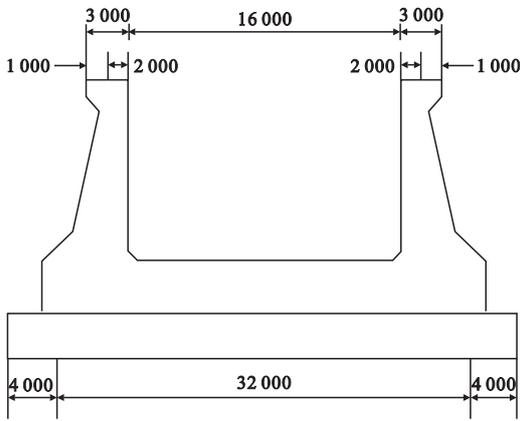


图1 船闸结构剖面图

Fig. 1 The cross-section of ship lock

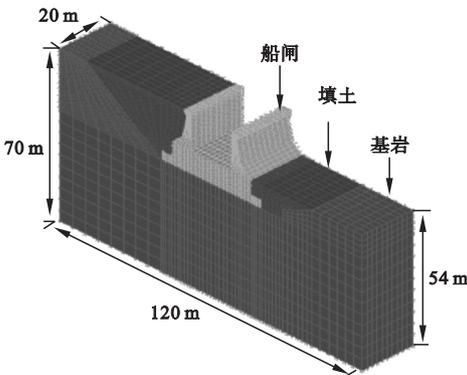


图2 三维有限元数值计算模型

Fig. 2 3-D computational model for numerical analysis

钢筋混凝土结构,混凝土等级为 C25,各部分材料的具体参数如表 1 所示. 计算水位选取正常工作水位,并将静水压力简化成荷载处理,不考虑地震引起动水压力的影响^[19]. 模型中单元均采用 8 结点 3D 实体单元,单元总数 26 440 个,节点总数 39 261 个,具体数值计算利用 64 位 32 核 CPU - 64G 内存 DELL T7600 高性能台式工作站完成.

表 1 材料参数

Table 1 Material parameters

材料名称	密度/($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)	弹性模量/GPa	泊松比
混凝土	2 500	26	0.167
砂卵石	1 900	20	0.35
基岩	2 600	40	0.265

2 结果与分析

2.1 地震反应谱分析

四川凤仪场船闸-地基动力相互作用体系振型如图 3 所示. 对于动力相互作用体系中船闸-闸室部分,其低阶振型趋势主要以 y 向和 z 向平动为主. 四川凤仪场船闸-地基动力相互作用体系前 50 阶各阶振型参与

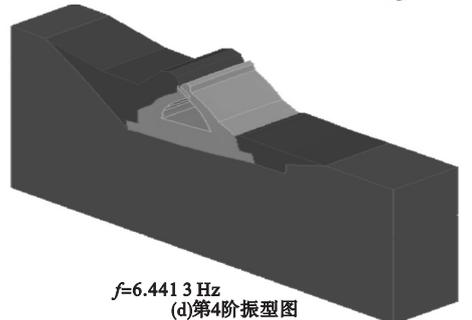
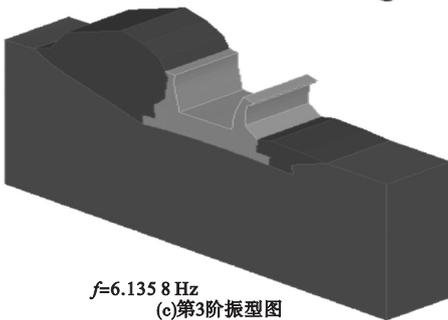
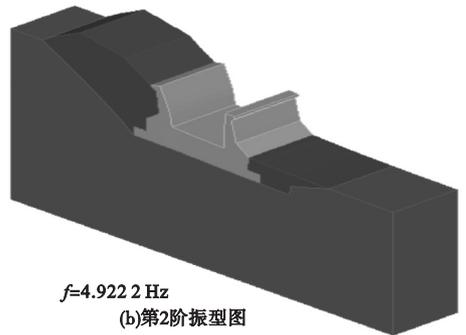
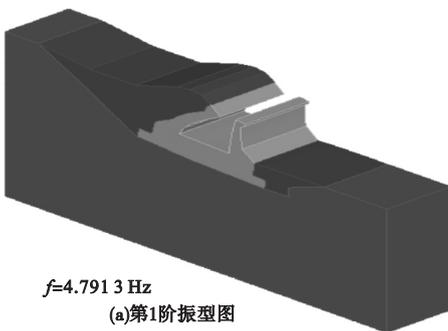


图3 船闸闸室体系振型图

Fig. 3 The modes of lock chamber system

质量随振型阶次的变化情况如图 4 所示. 由图 4 可知, 船闸闸室 - 地基相互作用体系在 y, z 方向上, 低阶振型参与质量均占有很高的比重, 该体系前 200 阶累计振型参与质量随振型阶次的变化情况分别如图 5 所示. 由图 5 可知, 前 200 阶振型在 y, z 方向上的累计振型参与质量分别为 94. 596%、95. 542%.

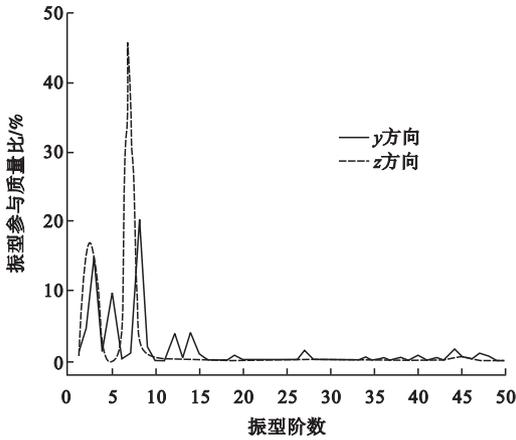


图 4 振型参与质量比

Fig. 4 The modal participation mass

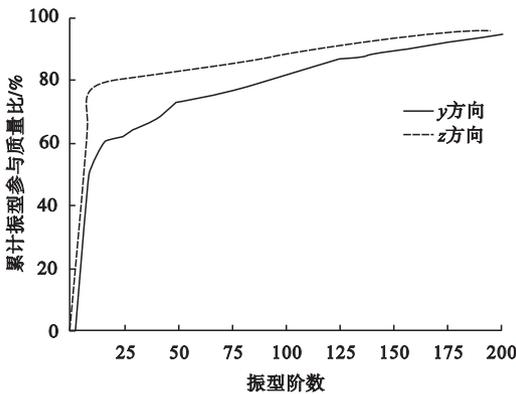


图 5 累计振型参与质量比

Fig. 5 The sum of modal participation mass

风仪场船闸所在地区的抗震设防烈度为 7 度, 基本地震加速度值 $0.15 g$, 地震水平影响系数最大值为 $\alpha_{max} = 0.15$, 场地的特征周期为 $T_g = 0.35 s$, 钢筋混凝土结构的阻尼比取为 0.05 . 风仪场船闸地震加速度规范设计反应谱曲线如图 6 所示.

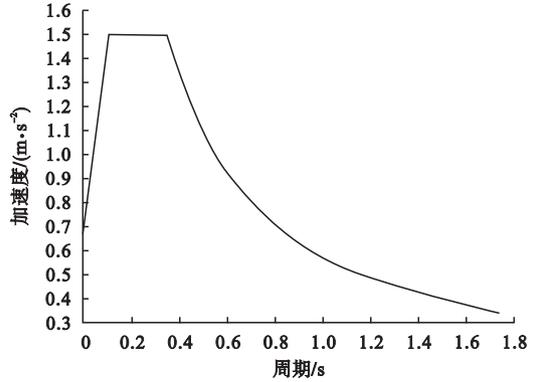


图 6 加速度反应谱曲线

Fig. 6 Response spectrum curve of acceleration

对风仪场船闸闸室 - 地基动力相互作用体系进行地震反应谱分析时取前 200 阶振型进行振型组合, 反应谱分析中采用 SRSS 组合法计算地震作用效应, 满足了《水运工程抗震设计规范》(JTS146—2012) 中“采用振型分解反应谱法计算地震作用效应时, 可由各阶振型的地震作用效应按平方和方根法组合”和“振型阶数应在计算方向获得 90% 以上有效质量”的规定. 分别进行了横向和竖向、纵向和竖向双向耦合地震输入下的地震反应谱分析.

横向(y 向)、横向(y 向) + 竖向(z 向)地震作用下动力相互作用体系横向位移等值分布情况分别如图 7、图 8 所示.

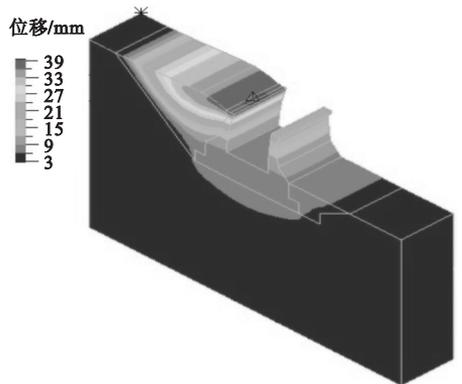


图 7 y 向地震输入作用下船闸体系横向位移等值图

Fig. 7 Contours of transverse horizontal displacement under y direction

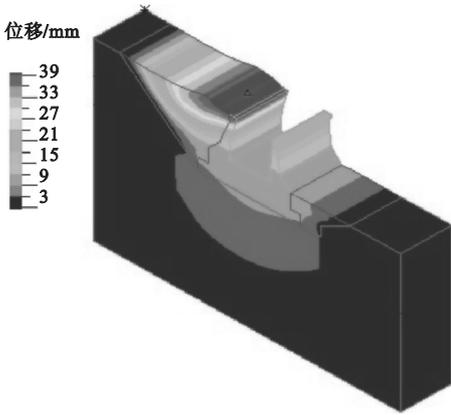


图8 $y+z$ 向地震输入作用下船闸体系横向位移等值图

Fig. 8 Contours of transverse horizontal displacement under y and z direction

对比图7和图8可知,竖向(z 向)地震作用对横向位移的影响很小,横向(y 向)+竖向(z 向)地震作用下横向位移云图与横向(y 向)地震作用下横向位移云图基本一致,两组地震输入作用下船闸-地基动力相互作用体系最大横向位移分别为40.5 mm(横向地震输入)和42.3 mm(横向+竖向地震输入),最大值相差较小。

横向(y 向)、横向(y 向)+竖向(z 向)两组地震作用下船闸结构部分最大主应力等值分布情况分别如图9和图10所示。

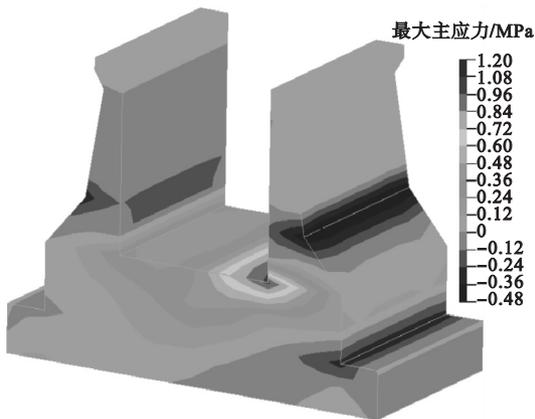


图9 y 向地震输入作用下船闸结构最大主应力等值图

Fig. 9 contours of the maximum stress under seismic action in y direction

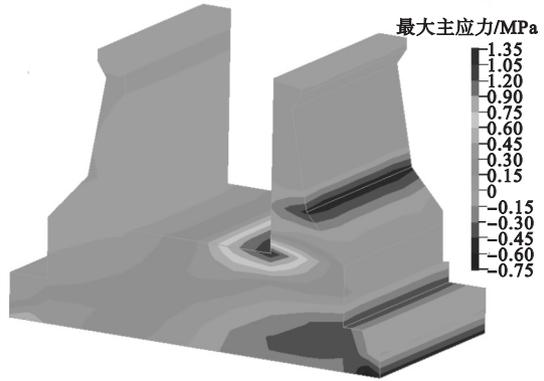


图10 $y+z$ 向地震输入作用下船闸结构最大主应力等值图

Fig. 10 Contours of the maximum stress under seismic action in y and z direction

对比图9和图10可知,横向(y 向)、横向(y 向)+竖向(z 向)地震作用下闸墙主要受压力作用,闸室底板主要受拉力作用,闸室结构最大拉应力均出现在右闸墙底部与闸室底板连接处。由图9和图10可见,横向(y 向)地震输入作用下船闸结构最大拉应力为1.11 MPa,横向(y 向)+竖向(z 向)地震输入作用下船闸结构最大拉应力为1.33 MPa(adin平台应力以拉为正)。

综合两组地震输入作用下关键受力变形指标如表2所示,表中安全系数为混凝土轴心抗拉强度标准值 f_{tk} (取1.78 MPa)与最大拉应力的比值。

表2 反应谱结果对比表

Table 2 The results of response spectrum analysis

输入方向	最大拉应力/MPa	最大 y 向位移/mm	安全系数
y	1.11	40.6	1.41
$y+z$	1.33	42.3	1.28

综合表2及图7~图10可知,结构在地震作用下受力变形,满足《水工建筑物抗震设计规范》要求。在横向(y 向)地震作用输入下,船闸闸室体系的安全系数为1.41。但特别地在横向(y 向)+竖向(z 向)地震作用输入下,船闸闸室体系的安全系数较小,为1.28,可能发生局部可修复损伤变形,因此需

进一步针对横向(y向)+竖向(z向)地震作用输入对船闸闸室-地基相互作用体系进行动力时程分析与校核.

2.2 三维地震响应动力时程分析

选取EI-Centro波、Taft波和人工波,并对三条地震波加速度峰值根据设防烈度进行

调幅(见图11).其中人工波是结合场地特点和规范设计反应谱,并基于文献[20]所述人工地震动合成方法得出的.下面将仅针对横向(y向)+竖向(z向)地震作用下对船闸闸室-地基相互作用体系进行弹性动力时程分析.

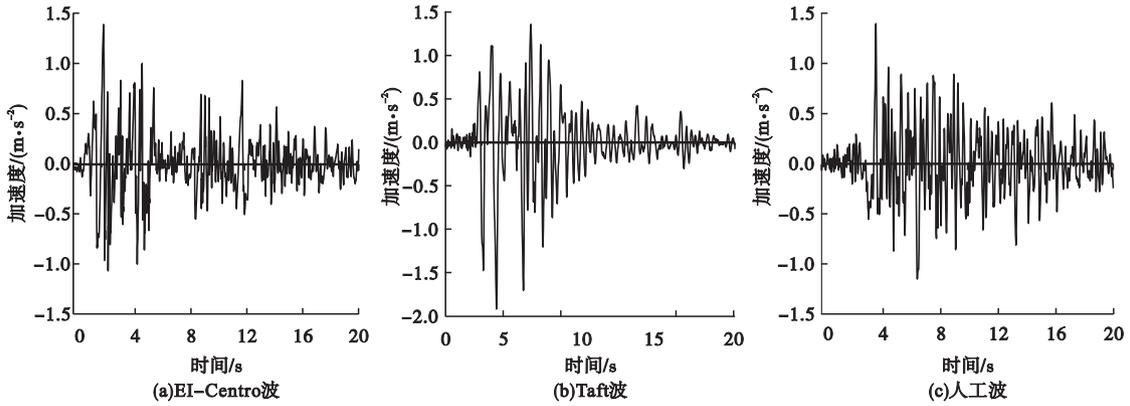


图11 地震波加速度时程

Fig. 11 Time histories of seismic wave acceleration

为分析不同地震波输入下船闸闸室体系的位移时程变化情况,特选取船闸闸室体系闸墙顶点为典型特征点.图12为各地震波作

用下船闸闸室体系闸墙顶点处的横向水平位移响应时程变化情况.

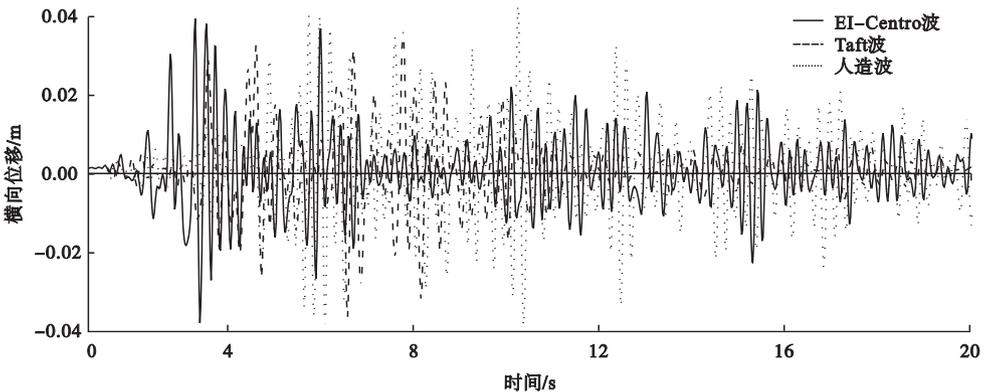


图12 各地震波作用下船闸闸室闸墙顶点水平位移响应时程曲线

Fig. 12 Time-history of horizontal displacements of lock chamber under seismic excitation

由图12可知,人工地震输入时特征点横向水平位移值最大,最大值为42.5 mm,出现在3.28 s处,与地震波加速度峰值相对应.峰值时刻的船闸闸室体系闸墙横向水平位移等值云图(见图13),船闸闸室体系闸墙最大主应力等值图(见图14).

大值出现在闸墙顶部,且左闸墙外侧填土在地震作用下同样出现较大的变形.由图14可知,闸墙主要受压力作用,闸室底板主要受拉力作用.由于右闸墙外侧无填土作用,使得峰值时刻船闸闸室结构最大拉应力值出现在右闸墙底部与闸室连接处.

由图13可知,峰值时刻横向水平位移最

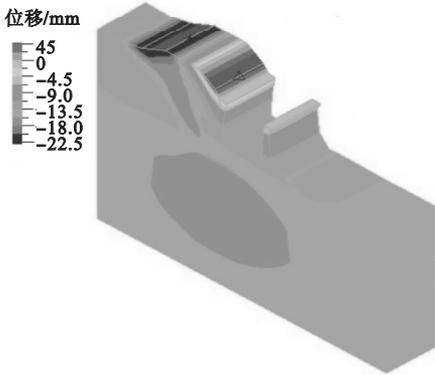


图13 峰值时刻的横向位移分布等值图

Fig. 13 Contours of transverse displacement under seismic action at peak value moment

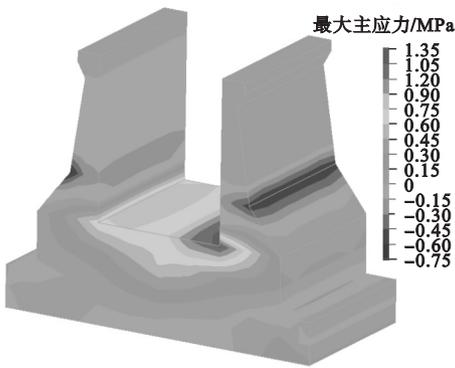


图14 峰值时刻的最大主应力等值图

Fig. 14 Contours of the maximum principal stress under seismic action at peak value moment

弹性动力时程分析主要计算结果及与振型分解反应谱法的对比情况详如表3所示。

表3 时程分析法与反应谱法结果对比情况

Table 3 Results comparison of time-domain analysis and response spectrum analysis

指标	回填标高较高侧闸墙 水平位移最大值/mm	回填标高较高侧闸墙 拉应力最大值/MPa
地震反应谱法	42.3	1.33
时程分析法	42.5	1.39

由表3可知,弹性动力时程分析计算结果与地震反应谱计算结果幅值水平相近,亦满足《水工建筑物抗震设计规范》中“不小于地震反应谱分析结果80%”的规定。在3组水平地震波作用下,船闸闸室体系闸墙横向

水平位移最大幅值为42.5 mm,最大拉应力为1.39 MPa。

3 结论

(1) 船闸-地基动力相互作用体系振型趋势以y向和z向平动为主,在y、z方向上的前200阶累计振型参与质量分别为94.596%、95.542%。

(2) 船闸-地基动力相互作用体系在横向、纵向+竖向地震作用下地震反应谱分析所得横向水平位移最大值为42.3 mm,闸室结构最大拉应力值为1.33 MPa,结果表明船闸闸室结构受力和变形满足抗震规范要求,但在纵向+竖向地震作用下安全系数1.28,幅值偏低,可能发生局部可修复损伤变形,需进一步针对纵向+竖向地震作用下对船闸闸室体系进行动力时程分析校核。

(3) 进一步动力时程分析校核结果与地震反应谱计算结果幅值水平相近,横向水平位移最大值为42.5 mm,闸室结构最大拉应力值为1.39 MPa,满足抗震规范要求。

参考文献

- [1] 李学义. 船闸高衬砌闸室结构计算分析[D]. 重庆:重庆交通大学,2014.
(LI Xueyi. High lining structure of lock chamber calculation and analysis[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2014.)
- [2] 方诗圣,苑敬舜,阚延炬. 颍上复线船闸下闸首结构内力主要影响因子分析[J]. 水力发电,2015,41(4):36-42.
(FANG Shisheng, YUAN Jingshun, KAN Yanju. Analysis on main impact factors of internal structure stress in lower head of yingshang second-line ship lock[J]. Water power, 2015, 41(4):36-42.)
- [3] 曹周红,练继建,刘晓平. 坞式结构有限元仿真模拟及施工过程对底板受力影响分析[J]. 工程设计学报,2013,20(4):326-331.
(CAO Zhouhong, LIAN Jijian, LIU Xiaoping. Finite element simulation of a castle structure and influence of the construction procedure on the floor stress[J]. Chinese journal of engineering design, 2013, 20(4):326-331.)

- [4] 苏超,李劲松,崔潇潇. 三维有限单元法在大型船闸闸首设计中的应用[J]. 水运工程, 2014, 491(5): 112 - 116.
(SU Chao, LI Jinsong, CUI Xiaohan. Application of three-dimensional finite element method in design of large lockship structure[J]. Port & waterway engineering, 2014, 491(5): 112 - 116.)
- [5] 华华. 基于 D - P 准则的闸首底板非线性有限元分析与比较[J]. 水运工程, 2014, 487(1): 147 - 151.
(HUA Hua. Nonlinear finite element analysis and comparison for lock head floor of shiplock based on D-P criterion[J]. Port & waterway engineering, 2014, 487(1): 147 - 151.)
- [6] 杨斌,朱旭. 船闸闸首非线性有限元计算分析[J]. 水道港口, 2010, 31(5): 537 - 542.
(YANG Bin, ZHU Xu. Calculation on lock head of ship lock by 3-D nonlinear finite element[J]. Journal of waterway and harbor, 2010, 31(5): 537 - 542.)
- [7] 潘宣何. 采用排桩支护结构的基坑开挖对邻近船闸的影响研究[D]. 长沙:长沙理工大学, 2010.
(PAN Xuanhe. The impact analysis of a nearby navigation lock by soldier-piles supporting structure foundation pit excavation[D]. Changsha: Changsha University of Science & Technology, 2010.)
- [8] 卜丁,杨斌. 船闸闸室结构三维有限元仿真分析[J]. 水运工程, 2010(9): 105 - 109.
(BU Ding, YANG Bin. Three dimensional finite element simulation analysis of lock chamber structure[J]. Port & waterway engineering, 2010(9): 105 - 109.)
- [9] 陈敏,曹邱林. 基于有限元船闸结构应力分析研究[J]. 水利与建筑工程学报, 2012, 10(1): 114 - 119.
(CHEN Min, CAO Qiulin. Study and analysis on stress of ship lock structure based on finite element[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2012, 10(1): 114 - 119.)
- [10] 孔庆阳,曹邱林. 基于有限元的反拱底板结构应力分析[J]. 水利与建筑工程学报, 2011, 9(4): 46 - 50.
(KONG Qingyang, CAO Qiulin. Analysis on stress of anti-arched floor structure by using FEM[J]. Journal of water resources and architectural engineering, 2011, 9(4): 46 - 50.)
- [11] VOLK R, STENGEL J, SCHULTMANN F. Building Information Modeling (BIM) for existing buildings-Literature review and future needs[J]. Automation in construction, 2014, 38: 109 - 127.
- [12] MILL T, ALT A, LIIAS R. Combined 3D building surveying technique terrestrial laser scanning(TLS) and total station surveying for BIM data management purposes[J]. Journal of civil engineering and management, 2013, 19: 23 - 32.
- [13] DAS S, CHEW M Y. Generic method of grading building defects using fmeca to improve maintainability decisions[J]. Journal of performance of constructed facilities, 2011, 25(6): 522 - 533.
- [14] JIN Y L, MUKHERJEE A. Modeling blockage failures in sewer systems to support maintenance decision making[J]. Journal of performance of constructed facilities, 2010, 24(6): 622 - 633.
- [15] SHARMA A, YADAVA G S, DESHMUKH S G. A literature review and future perspectives on maintenance optimization[J]. Journal of quality in maintenance engineering, 2011, 17(1): 5 - 25.
- [16] 张涛. 高水头船闸坞式结构抗震性能有限元数值模拟[D]. 重庆:重庆交通大学, 2012.
(ZHANG Tao. Numerical analysis of high-head ship lock with integral structure seismic stability[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2014.)
- [17] KONTOS S, ZDRAVKOVIC L, MENKITI C O, et al. Seismic response and interaction of complex soil retaining systems[J]. Computers and geotechnics, 2012, 39: 17 - 26.
- [18] LYUDMILA Y F, PAVEL S I, ALEKSANDR S I, et al. Analysis of complex impacts on stress-strain state of the wall chamber lock[J]. Procedia engineering 2015, 111: 215 - 219.
- [19] 崔春义,孟坤,许成顺. ADINA 在土木工程中应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 2015.
(CUI Chunyi, MENG Kun, XU Chengshun. Application of adina in civil engineering[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2015.)
- [20] 陈国兴. 岩土地震工程学[M]. 北京:科学出版社, 2007.
(CHEN Guoxing. Geotechnical earthquake engineering[M]. Beijing: The Science Publishing Company, 2007.)