

# 考虑结构与加锚岩体联合受力的船闸闸首 抗震性能研究

熊梦琪<sup>1</sup>, 李亚军<sup>2</sup>, 陈小虎<sup>3</sup>, 张汉云<sup>1</sup>, 蒋才<sup>3</sup>

(1. 河海大学水利水电学院, 江苏 南京 210098; 2. 三峡水力发电厂, 湖北 宜昌 443133;  
3. 长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430019)

**摘要:**为研究地震作用下结构与加锚岩体的非线性接触对闸首抗震性能的影响,以某双线五级船闸的第一级闸首为例,在ADINA有限元软件中建立库水-结构-锚杆-基岩动力相互作用的整体三维有限元模型,基于约束函数的非线性接触单元模拟了闸首结构中的各类接触问题,采用动力时程分析方法模拟了地震作用下闸首结构的动力响应、锚杆受力的分布规律以及不同接触面的接触状态。结果表明:设计地震作用下闸首各边墩均向航槽侧变形,位移沿高度方向递增;锚杆轴向拉应力的最大值小于其抗拉强度;不同介质间的接触面上部有往复开合的现象,接触面最大张开度沿高度方向递增,地震结束时接触面恢复到震前的紧贴状态;设计地震作用下该船闸闸首的结构变形、结构应力、锚杆受力情况及接触面接触状态均满足规范要求,具有良好的抗震性能。

**关键词:**船闸闸首;接触单元;锚杆;动力响应;抗震性能;非线性有限元

中图分类号:TV312

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2024)01-0060-06

**Study on seismic performance of a lock head considering combined force of structure and anchored rock mass//**  
XIONG Mengqi<sup>1</sup>, LI Yajun<sup>2</sup>, CHEN Xiaohu<sup>3</sup>, ZHANG Hanyun<sup>1</sup>, JIANG Cai<sup>3</sup> (1. College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. Three Gorges Hydropower Plant, Yichang 443133, China; 3. Changjiang Survey, Planning, Design and Research Co., Ltd., Wuhan 430019, China)

**Abstract:** To study the influence of nonlinear contact between structure and anchored rock mass on the seismic performance of a lock head under earthquake, taking the first stage lock head of a double-line five-stage ship lock as an example, a three-dimensional finite element model for the dynamic interaction of reservoir water-structure-anchor-bedrock was established in the finite element software ADINA. The various contact problems in the lock head structure were simulated by the nonlinear contact elements based on constraint function. The dynamic responses of the lock head structure, the distribution law of the anchor force, and the contact state of different contact surfaces under the design earthquake were analyzed by time-history analytical method. The results show that the piers on each side of the lock head are deformed to the side of the navigation channel under the design earthquake, and the displacement increases along the height direction. The maximum axial tensile stress of the anchor is less than its tensile strength. The upper parts of the contact surfaces between different contact pairs are repeatedly opening and closing. The maximum opening of the contact surface increases with elevation. At the end of the earthquake, the contact surface is restored to the state before earthquake. Therefore, the structural deformation, structural stress, anchor stress and contact surface contact state of the lock head all meet specification requirements under the design earthquake with good seismic capacity.

**Key words:** lock head; contact elements; anchors; dynamic response; seismic performance; nonlinear finite element

现阶段,对于水工建筑物抗震性能的研究主要集中在大坝等挡水建筑物上,针对通航建筑物抗震性能的研究不多<sup>[1-3]</sup>。通航建筑物是水利枢纽的重

要组成部分,船闸作为过坝通航建筑物的主要形式之一,对其抗震性能的研究应该受到高度重视。船闸闸首既是枢纽挡水建筑物,又是通航闸首,也是船

**基金项目:**国家自然科学基金项目(51709090);江苏省自然科学基金项目(BK20170884);中国水利水电科学研究院水利部水工程建设与安全重点实验室项目(IWHR-ENGI-202303)

**作者简介:**熊梦琪(2000—),女,硕士研究生,主要从事水工结构抗震减振研究。E-mail:211302020067@hhu.edu.cn

**通信作者:**张汉云(1984—),女,副教授,博士,主要从事水工结构抗震减振研究。E-mail:zhanghanyun@hhu.edu.cn

闸应力、变形和稳定控制的关键部位,闸首的抗震性能对整个水利枢纽的正常运行和抗震安全至关重要。

近年来,国内外学者围绕船闸抗震性能开展了研究。例如:Kontoe 等<sup>[4]</sup>采用子结构技术建立船闸结构-场地二维平面应变有限元模型,对船闸体系的地震响应进行了探讨分析;陕亮等<sup>[5]</sup>以三峡永久船闸混合式闸室墙为研究对象,采用三维有限元法对接触问题进行了非线性仿真计算,探讨了衬砌墙和重力墙之间是否设置水平分缝的问题,并分析了设置过缝钢筋的利弊;苏超等<sup>[6]</sup>建立了闸首-地基三维有限元模型,考虑地基材料的非线性特点,地基模型采用邓肯-张 E-B 模型,使用 ABAQUS 软件分析了运行工况下闸首的应力分布规律及变形特点;崔春义等<sup>[7]</sup>研究了船闸闸室体系动力受力变形特性,分析了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,结果表明,船闸结构满足抗震规范要求;丁天平等<sup>[8]</sup>针对新夏港船闸,采用黏弹性边界和动力接触模型,研究了地震作用下错位布置闸首接触非线性对闸首结构应力及变形的影响,为工程的安全运行提供了依据。这些研究成果为船闸工程的抗震设计提供了有益参考,但较少考虑地震作用下结构-锚杆-基岩间的动力相互作用。由于闸首是紧贴岩体修建的混凝土结构,二者为不同材料间的接触,其间存在一个接触面,地震作用下接触面的接触状态会影响闸首结构和锚杆的受力和变形<sup>[9]</sup>。

本文以某双线五级船闸的第一级闸首为研究对象,在 ADINA 有限元软件中建立库水-结构-锚杆-基岩动力相互作用的三维整体有限元模型,基于约束函数的非线性接触单元模拟闸首结构中的各类接触问题,采用动力时程分析方法分析地震作用下闸首结构的动力响应、锚杆受力的分布规律以及不同接触面的接触状态,以期综合评价该船闸闸首的抗震安全性。

## 1 理论和方法

### 1.1 接触非线性分析理论

地震荷载作用下,不同材料间的开合及滑移现象是一种复杂的非线性行为,为接触非线性问题。本文采用接触约束函数算法,引入约束函数来描述接触面之间的法向和切向的接触约束条件<sup>[10]</sup>。

法向约束函数  $w(g, \lambda)$  为

$$w(g, \lambda) = \frac{g + \lambda}{2} - \sqrt{\left(\frac{g - \lambda}{2}\right)^2 + \varepsilon_N} \quad (1)$$

式中:  $g$  为接触面间的法向间距;  $\lambda$  为接触面间的法向接触力;  $\varepsilon_N$  为一个极小的常数。若  $g=0$  且  $\lambda>0$ , 接触面闭合; 若  $g>0$  且  $\lambda=0$ , 接触面张开。  $\varepsilon_N$  的作

用是使法向接触条件的数学表示更加平滑,有利于计算收敛。

切向摩擦约束函数  $v(\dot{u}, \tau)$  满足

$$\tau + v(\dot{u}, \tau) - \frac{2}{\pi} \arctan \left[ \frac{\dot{u} - v(\dot{u}, \tau)}{\varepsilon_T} \right] = 0 \quad (2)$$

其中

$$\tau = \frac{|f_{cT}|}{\mu \lambda}$$

式中:  $\dot{u}$  为接触面间的相对滑动速度;  $\varepsilon_T$  为一个极小的常数;  $f_{cT}$  为切向摩擦力;  $\mu$  为接触面间摩擦系数。当  $|\tau|<1$  时, 接触面间不发生相对滑移; 当  $|\tau|=1$  时, 接触面间会发生相对滑移, 且相对滑移速度的方向与  $\tau$  一致。  $\varepsilon_T$  被用于控制规则化摩擦模型和库仑摩擦模型的接近程度。

### 1.2 锚杆的模拟方法

采用 Truss 单元模拟锚杆。在计算中自动将锚杆的轴线与 3D-solid 单元相关联, 如图 1 所示。对于每一根模拟锚杆的线, 程序都会搜索到它与 3D-solid 单元边界的交叉点, 在此交叉点处生成 Truss 单元的节点。然后通过 Truss 单元节点与 3D-solid 单元节点之间建立约束方程的形式模拟锚杆对基岩和结构的加强作用。

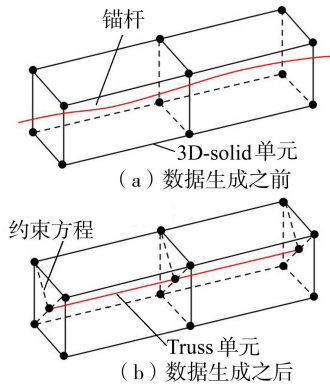


图1 锚杆的模拟

## 2 有限元模型与计算工况

### 2.1 有限元模型

某船闸为双线五级船闸, 闸首为 1 级建筑物, 闸首和闸室均建在山体深切开挖形成的岩石深槽中, 两线船闸平行布置<sup>[11]</sup>。闸首为重力式结构, 高 59 m, 顺流向长 70 m, 垂直流向单线宽 74 m。有限元建模时, 基岩模拟范围为竖直向向下取 1.5 倍闸首高度, 即 89 m; 上下游自闸首各延伸 3 倍闸首高度<sup>[12]</sup>, 即 177 m; 左右岸自闸室外侧分别向两侧延伸 3 倍单线闸室宽度, 即 102 m, 整体有限元模型范围为 424 m×372 m×155 m。闸首、挡水坝、基岩、回填土与回填混凝土均采用 3D-solid 单元模拟, 库水采用 3D-fluid 单元模拟, 锚杆采用 Truss 单元模拟。图 2 为结构、锚杆的剖面布置图, 基岩与闸首边墩间共布

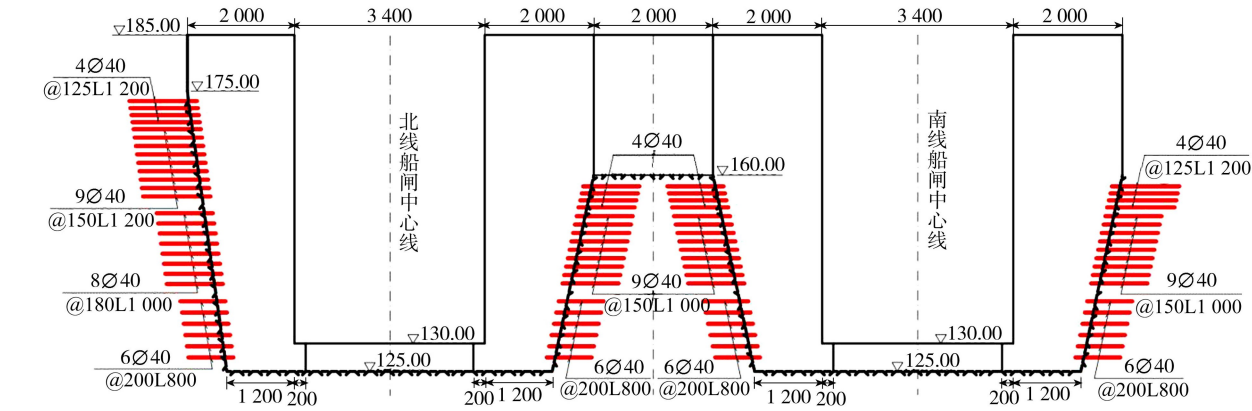


图2 结构、锚杆剖面布置图(高程单位:m;锚杆直径单位:mm;其他尺寸单位:cm)

置了3 332根锚杆,直径均为40 mm,其抗拉强度值为1 000 MPa。

模型底部施加固定约束,四周采用法向链杆约束。库水与结构的交界面设为流固耦合界面,库水表面设为自由液面边界,库水其他临空面设为无限远边界,挡水闸门处设置壁面边界。船闸闸首的结构布置如图3所示,整体三维有限元网格模型如图4所示。图中 $x$ 方向为顺水流方向指向上游, $y$ 方向为垂直流向,指向右岸, $z$ 方向为竖直向上。整体有限元模型节点总数为89 814,单元总数为77 909。

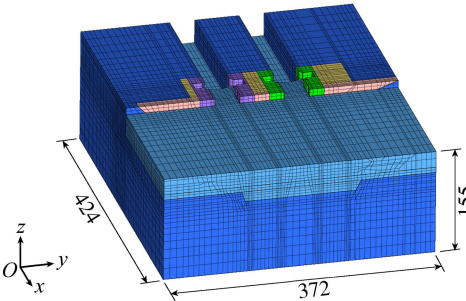


图4 有限元模型(单位:m)

表1 材料参数取值

| 部位    | 弹性模量/GPa | 泊松比   | 密度/( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) |
|-------|----------|-------|-------------------------------|
| 边墩    | 26.1     | 0.167 | 2 500                         |
| 底板    | 27.5     | 0.167 | 2 500                         |
| 挡水坝   | 25.4     | 0.167 | 2 500                         |
| 回填土   | 0.02     | 0.300 | 2 100                         |
| 回填混凝土 | 20.2     | 0.167 | 2 500                         |
| 基岩    | 35.0     | 0.200 | 2 750                         |
| 锚杆    | 210.0    | 0.300 | 7 850                         |

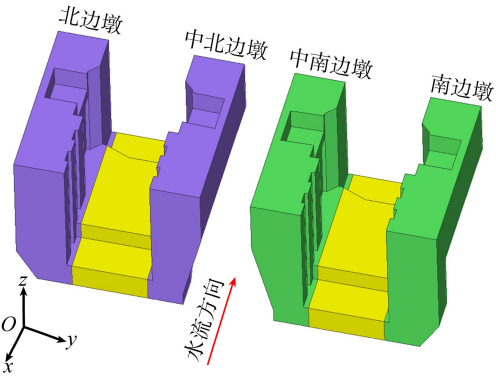


图3 船闸闸首结构布置

船闸各部位材料参数见表1,库水密度为 $1\,000\text{ kg}/\text{m}^3$ ,不考虑库水的可压缩性。根据GB 51247—2018《水工建筑物抗震设计标准》,在动力时程分析中结构阻尼比取0.07。

闸首边墩与基岩、回填混凝土、回填土的交界面,边墩与底板间的结构缝,边墩与挡水坝间的结构

缝均采用接触单元模拟,其中边墩与底板间的结构缝考虑了10 mm缝宽,不同接触单元组见图5。

## 2.2 计算工况与荷载

根据JTJ 307—2001《船闸水工建筑物设计规范》和船闸的实际运行情况,选取正常运行工况遇地震的情况进行静动综合分析。该工况下两闸线均采用人字门挡水,上游水深44 m,下游水深21.4 m,计算时考虑了结构自重、人字门自重、墙后渗透压力、土压力、水压力、扬压力、人字门顶枢推拉杆拉力及地震荷载。

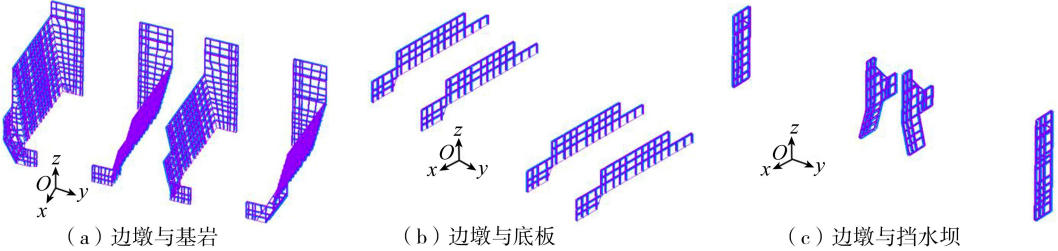


图5 不同接触单元组示意图



该工程抗震设防类别为甲类,水平向设计地震动峰值加速度按 100 年 2% 超越概率取值为  $110\text{ cm/s}^2$ ,竖向地震动峰值加速度为水平向的  $2/3$ ,各向加速度时程曲线如图 6 所示。动力时程分析中,采用无质量地基,同时输入 3 个方向的加速度时程,地震持时 12 s,计算时间步长 0.02 s。计算时考虑静动综合作用,即在静力分析的基础上,采用重启进行非线性动力时程分析。

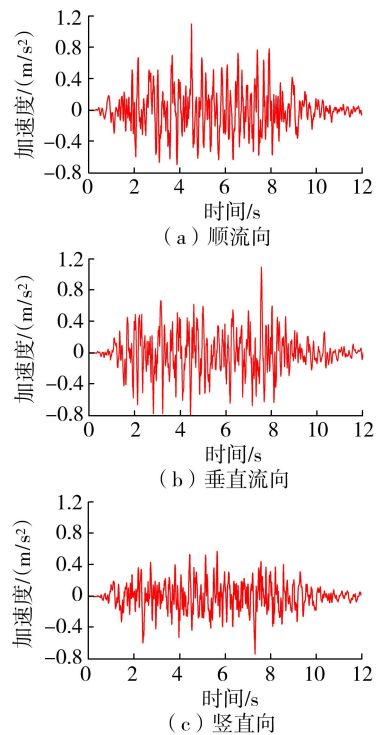


图 6 各向地震加速度时程曲线

3 结果与分析

3.1 结构动力响应

南、北线船闸的各方向静动综合位移最大值分布规律基本相同,垂直流向位移大于顺流向位移。其中北边墩和中北边墩、南边墩和中南边墩的垂直流向静动综合位移绝对值的最大值呈对称分布,如图 7 所示,各边墩均向航槽侧变形,位移沿高度方向递增,位移绝对值的最大值的极值出现在中北边墩上游航槽侧顶部,为  $-3.2\text{ mm}$ 。

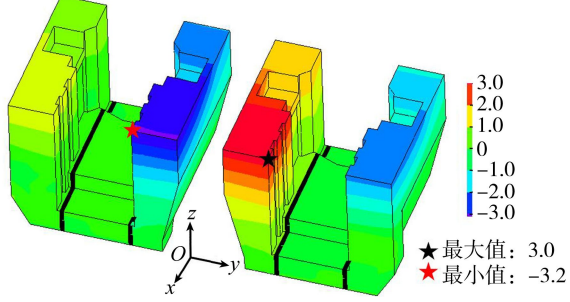


图 7 垂直流向位移绝对值的最大值包络云图(单位:mm)

表 2 列出了运行工况下,各边墩人字门作用线处沿高程各点与人字门底枢在垂直流向的相对位移极值,表中的正值表示结构在该位置沿  $y$  轴正方向产生变形,负值表示结构在该位置沿  $y$  轴负方向产生变形。在高程 157、165、175 m 处,中北边墩和中南边墩作用线上的相对位移大于南边墩作用线上的相对位移,北边墩作用线上各点的相对位移最小。高程 157 m 以上,各边墩人字门作用线上的相对位移沿高程增加,185 m 高程处相对位移极值最大,值为  $1.617\text{ mm}$ ,小于允许的相对位移值  $5\text{ mm}$ ,不会对入字门的运行带来不利影响。

表 2 各边墩人字门作用线处结构垂直流向相对位移极值

| 高程/m | 相对位移极值/mm |        |       |        |
|------|-----------|--------|-------|--------|
|      | 北边墩       | 中北边墩   | 中南边墩  | 南边墩    |
| 185  | 0.587     | -1.617 | 1.281 | -1.304 |
| 175  | 0.406     | -1.152 | 0.959 | -0.916 |
| 165  | 0.184     | -0.677 | 0.599 | -0.466 |
| 157  | 0.022     | -0.329 | 0.316 | -0.151 |
| 145  | -0.277    | -0.015 | 0.024 | 0.059  |

地震作用下,结构的竖向向正应力以压应力为主,局部出现拉应力,但拉应力水平远小于压应力水平。竖向向拉应力最大值的极值出现在北边墩上游外侧,为  $0.180\text{ MPa}$ ,压应力最大值的极值出现在中南边墩结构缝上游侧顶部,为  $3.383\text{ MPa}$ 。第一主应力最大值的极值出现在中北边墩结构缝上游侧顶部,为  $0.566\text{ MPa}$ ,第三主应力最小值的极值出现在南边墩上游面外侧拐点,为  $-3.969\text{ MPa}$ 。闸首基底出现的竖向向拉应力区最大范围如图 8 中红色区域所示,双线基底拉应力区最大范围所占比例均为  $0.275\%$ ,远小于建基面宽度的  $0.07$  倍,且远离防渗帷幕中心线,满足应力控制标准。

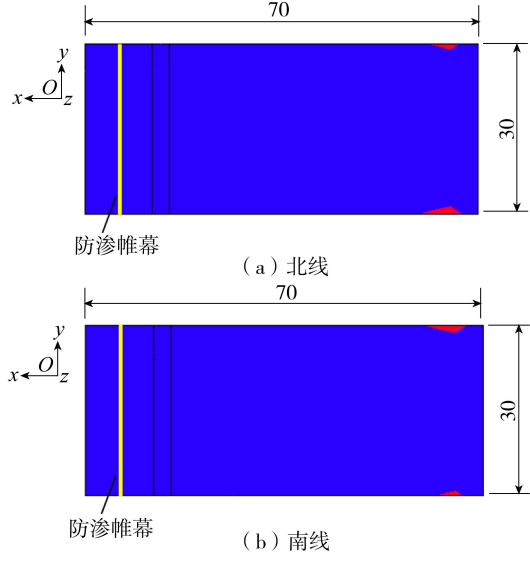


图 8 双线基底拉应力区最大范围(单位:m)



3.2 锚杆应力

地震作用下锚杆轴向应力绝对值的最大值包络云图如图 9 所示。由图 9 可知,锚杆轴向应力多为拉应力,最大值仅发生在局部,位于结构与基岩的接触面上,绝大多数锚杆的轴向拉应力值小于30 MPa。锚杆轴向拉应力随着高程的增加而增大,由于北边墩的基岩高程较高,锚杆分布高程也较高,北边墩上部 1/3 高程处锚杆的拉应力值为 34 MPa 左右,最大值发生在偏上游侧 171.95 m 高程处,为 204.4 MPa。锚杆强度安全系数为 4.89,大于控制值 1.65,满足控制要求。

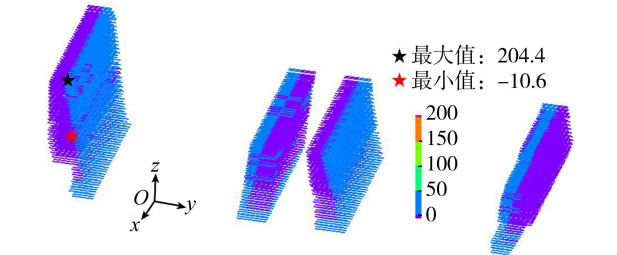


图 9 锚杆轴向应力绝对值的最大值包络云图(单位:MPa)

3.3 接触面开合状态

3.3.1 边墩与基岩的接触状态

地震作用下,闸线两侧边墩向船槽内侧变形,闸首边墩与基岩的接触面会出现往复开合的现象。闸首边墩与基岩接触面最大张开度包络云图如图 10 所示。由图 10 可知,地震作用下最大张开度发生在中北边墩与基岩接触面的航槽外侧顶部,值为 0.8 mm,除了中北、中南两个边墩下游面以及南边墩顶部有明显张开外,地震时接触面其他部分均处于紧贴状态。

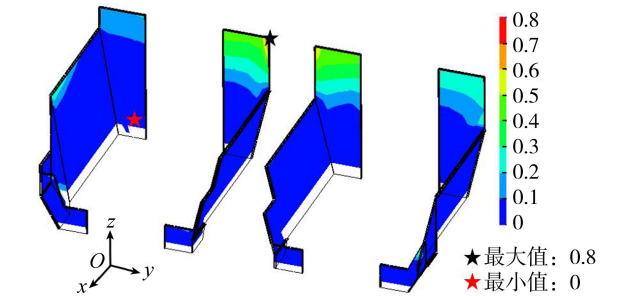


图 10 边墩与基岩接触面最大张开度包络云图(单位:mm)

图 11 为地震过程中闸首中北边墩与基岩接触面最大张开度随高程变化的曲线。由图 11 可知,地震作用下高程 160 m 以下的结构与基岩接触良好,地震作用下仍然保持紧贴状态,高程 160 m 以上接触面张开度随着高程的增加而增大,最大值出现在顶部。为了研究地震过程中接触面的开合变化,选取张开度最大值点绘制了时程曲线,如图 12 所示。从时程曲线来看,地震过程中接触面是开合往复的,在地震结束时恢复到了震前的紧贴状态。

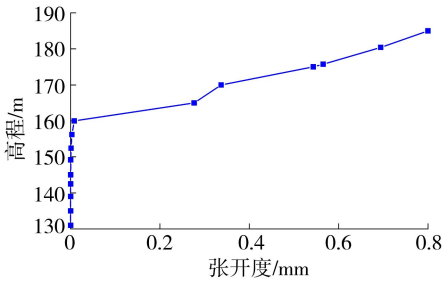


图 11 闸首中北边墩与基岩接触面最大张开度与高程关系

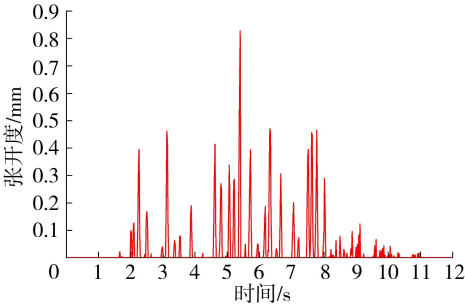


图 12 边墩与基岩接触面张开度最大值点时程曲线

3.3.2 边墩与底板的接触状态

地震作用下各边墩与底板间结构缝最大张开度包络云图如图 13 所示。由图 13 可知,由于10 mm结构缝的存在,接触面基本处于张开的状态。地震作用下结构缝最大张开度为 10.2 mm,出现在中南边墩结构缝上游侧顶部角点处。结构缝张开度最大值点时程曲线如图 14 所示,在地震持续的过程中结构缝的宽度始终在 10 mm 附近变化,地震结束时,又恢复到了地震前的接触状态。

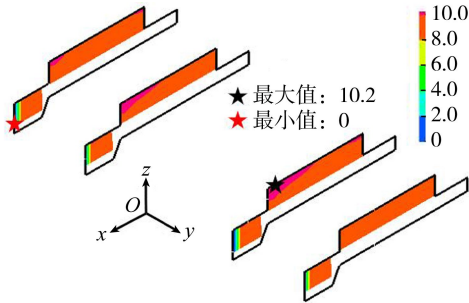


图 13 边墩与底板间结构缝最大张开度包络云图(单位:mm)

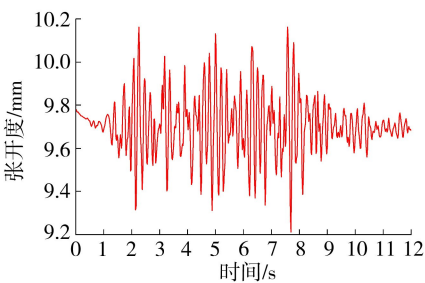


图 14 边墩与底板间结构缝张开度最大值点时程曲线

3.3.3 边墩与挡水坝的接触状态

挡水坝与各闸首边墩的交界面也采用了接触单元进行模拟,根据计算结果绘制了接触面的最大张

开度包络云图,如图 15 所示。由图 15 可知,地震作用下接触面最大张开度为 1.4 mm,出现在中南边墩与挡水坝接触面的上游侧顶部,张开度沿高度方向递增,挡水坝与边墩在中下部接触良好,地震过程中仍处于紧贴状态。张开度最大值点的时程曲线如图 16 所示,在地震持续的过程中接触面是开合往复的,在地震结束时,又恢复到了震前的接触状态。

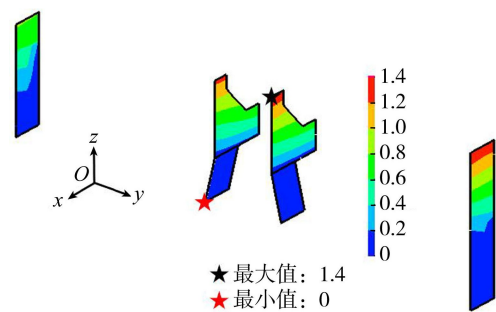


图 15 闸首边墩与挡水坝接触面最大张开度包络云图  
(单位:mm)

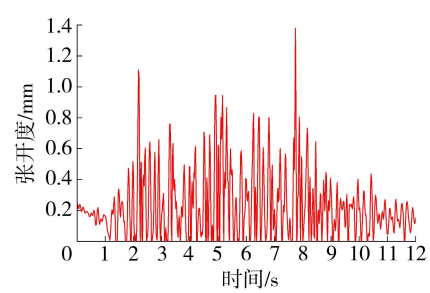


图 16 边墩与挡水坝接触面张开度最大值点时程曲线

## 4 结 论

- a. 在地震过程中,闸首两侧边墩向船槽侧变形,各边墩人字门作用线上的相对位移最大值小于 5 mm,满足人字门槽变形控制要求。闸首结构基底拉应力区最大范围所占比例为 0.275%,远小于建基面宽度的 0.07 倍,且远离防渗帷幕中心线,满足应力控制标准。
- b. 锚杆轴向拉应力的最大值为 204.4 MPa,仅发生在局部,且远小于锚杆的抗拉强度 1000 MPa;锚杆强度安全系数值大于 1.65,满足控制要求。
- c. 在地震的持续作用下,闸墩中下部与基岩的接触面始终处于紧贴的联合受力状态;地震结束时,上部接触面恢复到了震前状态。
- d. 设计地震作用下,边墩与底板之间的间隙在结构缝宽度附近变化,始终保持各自独立的受力状态。闸首各边墩与挡水坝间结构缝上部的最大张开度较小,不会破坏结构缝间的止水结构。
- e. 在设计地震作用下,该船闸第一闸首的结构变形、结构应力、锚杆受力情况以及接触面接触状态均满足规范要求,具有良好的抗震性能。

## 参考文献:

[ 1 ] 陈厚群. 水工建筑物抗震设防标准研究[J]. 中国水利, 2010 ( 20 ) : 4-6. ( CHEN Houqun. Seismic fortification levels for hydraulic structures [ J ]. China Water Resources, 2010 ( 20 ) : 4-6. ( in Chinese ) )

[ 2 ] 岑威钧,张自齐,周涛,等. 覆盖层上高面板堆石坝的极限抗震能力[J]. 水利水电科技进展, 2016, 36 ( 2 ) : 1-5. ( CEN Weijun, ZHANG Ziqi, ZHOU Tao, et al. Maximum seismic capacity of a high concrete-face rockfill dam on alluvium deposit [ J ]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2016, 36 ( 2 ) : 1-5. ( in Chinese ) )

[ 3 ] 王碧玉,曹邱林. 水闸抗震性能评价模型研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39 ( 9 ) : 140-144. ( WANG Biyu, CAO Qiulin. Study on evaluation model of seismic performance of sluice [ J ]. Water Resources and Power, 2021, 39 ( 9 ) : 140-144. ( in Chinese ) )

[ 4 ] KONTAE 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.

[ 5 ] 陕亮,徐跃之,肖汉江. 三峡永久船闸混合式闸室墙接触问题数值分析[J]. 南水北调与水利科技, 2008, 6 ( 2 ) : 72-74. ( SHAN Liang, XU Yuezhi, XIAO Hanjiang. Numerical analysis on the contact of the mixed chamber wall of the permanent ship-lock of the Three Gorges Reservoir [ J ]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2008, 6 ( 2 ) : 72-74. ( in Chinese ) )

[ 6 ] 苏超,陈鹏,邓西标. 有限元法在船闸闸首结构设计中的应用[J]. 水运工程, 2015 ( 11 ) : 105-109. ( SU Chao, CHEN Peng, DENG Xibiao. Application of FEM for structural design of lock head [ J ]. Port & Waterway Engineering, 2015 ( 11 ) : 105-109. ( in Chinese ) )

[ 7 ] 崔春义,孟坤,程学磊,等. 船闸闸室-地基相互作用体系地震动力特性三维数值分析[J]. 沈阳建筑大学学报 ( 自然科学版 ), 2017, 33 ( 2 ) : 251-258. ( CUI Chunyi, MENG Kun, CHENG Xuelei, et al. 3-D numerical analysis of dynamic response of lock chamber system [ J ]. Journal of Shenyang Jianzhu University ( Natural Science ), 2017, 33 ( 2 ) : 251-258. ( in Chinese ) )

[ 8 ] 丁天平,牛志国,高勇. 双线船闸错位布置闸首动力响应分析[J]. 人民珠江, 2018, 39 ( 12 ) : 129-134. ( DING Tianping, NIU Zhiguo, GAO Yong. Dynamic response analysis of lock heads with dislocation layout in the double locks [ J ]. Pearl River, 2018, 39 ( 12 ) : 129-134. ( in Chinese ) )

[ 9 ] 徐跃之,黄作森,林绍忠. 三峡永久船闸第三闸首接触问题仿真计算[J]. 长江科学院院报, 1998, 15 ( 4 ) : 23-27. ( XU Yuezhi, HUANG Zuosen, LIN Shaozhong. Simulation calculation on contact problem for third head of TG' s permanent lock [ J ]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 1998, 15 ( 4 ) : 23-27. ( in Chinese ) )

( 下转第 72 页 )

2022,42(2):114-118. (in Chinese))

[ 7 ] CHEN Shuo,ZHAO Haitao,CHEN Yu,et al. Experimental study on interior relative humidity development in early-age concrete mixed with shrinkage-reducing and expansive admixtures [ J ]. Construction and Building Materials, 2020,232:117204.

[ 8 ] MO L, DENG M, WANG A. Effects of MgO-based expansive additive on compensating the shrinkage of cement paste under non-wet curing conditions[J]. Cement and Concrete Composites,2012,34(3):377-383.

[ 9 ] 吴胜兴,孙克纬,沈德建. 新拌混凝土骨料分布均匀性表征方法及其应用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2022, 50 ( 1 ): 67-75. ( WU Shengxing, SUN Kewei, SHEN Dejian. Characterization method and application of the uniformity of aggregate distribution in fresh concrete [J]. Journal of Hohai University ( Natural Sciences ), 2022,50(1):67-75. (in Chinese) )

[10] 刘建忠,孙伟,缪昌文,等. 矿物掺合料对低水胶比混凝土干缩和自收缩的影响[J]. 东南大学学报(自然科学版),2009,39(3):580-585. ( LIU Jianzhong,SUN Wei, MIAO Changwen,et al. Effect of mineral admixtures on drying and autogenous shrinkage of concrete with low water-to-binder ratio[J]. Journal of Southeast University ( Natural Science Edition ), 2009, 39 ( 3 ): 580-585. ( in Chinese ) )

[11] 张彬. 水泥基材料的高温特性及其再水化修复的研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2012.

[12] WU Linmei, FARZADNIA N, SHI Caijun, et al. Autogenous shrinkage of high performance concrete: a review [ J ]. Construction and Building Materials, 2017, 149:62-75.

[13] MASTALI M, KINNUNEN P, DALVAND A, et al. Drying shrinkage in alkali-activated binders;a critical review[J]. Construction and Building Materials,2018,190:533-550.

[14] 李黎. 高温后多尺度纤维水泥基材料性能演化规律与微观机理[D]. 大连:大连理工大学,2019.

[15] 李东升,吴国立,冯思超. 纤维增强水泥基复合材料力学性能的研究进展[J]. 河南科技,2023,42(2):89-92. ( LI Dongsheng, WU Guoli, FENG Sichao. Research progress on mechanical properties of fiber-reinforced cement matrix composites [ J ]. Henan Science and Technology,2023,42(2):89-92. (in Chinese) )

[16] LIU Zixing, CAO Mingli, XIE Chaopeng. The mechanical properties of mortar blended with steel-PVA hybrid fibers and CaCO<sub>3</sub> whiskers under freeze/thaw cycles condition [J]. Arabian Journal for Science and Engineering,2023, 48(4):4451-4469.

[17] 刘子兴. 碳酸钙晶须水泥基复合材料耐磨性与抗冻性[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[18] 曹明莉,许玲,张聪. 不同水灰比、砂灰比下碳酸钙晶须对水泥砂浆流变性的影响[J]. 硅酸盐学报,2016,44(2):246-252. ( CAO Mingli, XU Ling, ZHANG Cong. Influence of calcium carbonate whisker on rheology of cement mortar with different water-cement ratios and sand-cement ratios[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2016,44(2):246-252. (in Chinese) )

[19] ZHANG Xiuzhi, SUN Hailong, YANG Haibo, et al. Rheological properties of nanosilica-modified cement paste at different temperatures and hydration times [ J ]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33 ( 1 ): 04020404.

[20] 位建强. 碳酸钙晶须增强水泥基复合材料的基础研究[D]. 大连:大连理工大学,2011.

[21] POWERS T C, BROWNYARD T L. A tribute of the physical properties of hardened Portland cement paste [ R ]. Farmington Hills: Compressive Strength, American Concrete Institute,2008.

[22] 周文芳. 复合水泥净浆化学收缩影响因素研究[D]. 长沙:长沙理工大学,2013.

[23] 刘高鹏,廖宜顺,刘立军,等. 苈麻纤维水泥基材料的力学性能与自收缩试验研究[J]. 功能材料,2019,50(7):7176-7181. ( LIU Gaopeng, LIAO Yishun, LIU Lijun,et al. Experimental study on mechanical properties and autogenous shrinkage of cement-based materials with ramie fiber[J]. Journal of Functional Materials,2019,50(7):7176-7181. (in Chinese) )

[24] 谢超鹏. 多尺度纤维水泥基复合材料断裂性能研究[D]. 大连:大连理工大学,2021.

[25] CAO Mingli, ZHANG Cong, WEI Jianqiang. Microscopic reinforcement for cement based composite materials [ J ]. Construction and Building Materials,2013,40:14-25.

(收稿日期:2023-07-14 编辑:熊水斌)

(上接第 65 页)

[10] BATHE K J,BOUZINOV P A. On the constraint function method for contact problems[J]. Computers & Structures, 1997,64(5/6):1069-1085.

[11] 钮新强,宋维邦. 船闸与升船机设计[M]. 北京:中国水利水电出版社,2007.

[12] 彭思贤,赵兰浩,毛佳. 大宽高比弧形钢闸门流激振动数值分析[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):90-96. ( PENG Sixian, ZHAO Lanhao, MAO Jia. Numerical analysis of flow-induced vibration of a steel radial gate with large width to height ratio[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources,2022,42(3):90-96. (in Chinese) )

(收稿日期:2023-02-27 编辑:俞云利)