DOI:10.3880/j.issn.1006-7647.2013.02.016

某电站取水隧洞与热水回流沟衔接段抗震分析

赵 杰,王桂萱,程 翔

(大连大学土木工程技术研究与开发中心,辽宁 大连 116622)

摘要:运用动力时程反应分析方法,利用非线性有限差分软件 FLAC3D 对某电站取水隧洞与热水回流沟衔接段结构进行抗震分析。针对场地地质特征和回填条件分析结构地震响应,通过编制 FLAC3D 程序并结合五点公式计算衬砌结构的内力,给出了衬砌内力包络图。数值分析结果表明:在相同的荷载效应组合情况下,温度的改变对内力的影响较为显著,温度荷载不仅显著改变了隧洞和热水回流沟衔接段的内力大小,而且改变了某些部位的内力方向;衔接段采用圆形接口优于采用方形接口。

关键词:取水隧洞;热水回流沟;抗震分析;内力包络图;FLAC3D 软件

中图分类号:TV671;P315.9 **文献标志码**:A **文章编号**:1006-7647(2013)02-0073-05

Seismic analysis of the joint section between intake tunnel and hot-water circumfluence groove for a hydropower station//ZHAO Jie, WANG Guixuan, CHENG Xiang (*Research and Development Center of Civil Engineering Technology, Dalian University, Dalian* 116622, *China*)

Abstract: By using the dynamic time-history analysis method, seismic analysis was performed on the joint section between the intake tunnel and the hot-water circumfluence groove for a hydropower station by FLAC3D software. Aiming at the geological characteristics and the backfill condition of the site, analysis of seismic response for the joint section was carried on, and the internal forces of the lining structure were calculated by combining secondary development of FLAC3D with the five-point formula. Based on it, the internal force envelop diagram for the lining structure was presented. Numerical simulation shows that, under identical load effect combination, the effect of temperature on internal forces is remarkable: the variety on temperature load not only significantly changes the value but also changes the orientations of the internal forces for certain parts. Meanwhile, it can be concluded that the circular interface is superior to the square interface for the joint section.

Key words: intake tunnel; hot-water circumfluence groove; seismic analysis; internal force envelop diagram; FLAC3D software

近年来,地下结构在能源、交通、通讯、城市建设和国防工程中获得广泛应用,地下结构的重要性也日益显现。随着地下结构震害的频繁发生,地下结构抗震问题日益受到世界各国地震工作者的高度重视。研究地下结构抗震性能的主要途径有原型观测、模型试验和数值模拟[1]。由于问题极其复杂,目前还没有哪一种手段能够完全实现对地下结构动力反应进行全面而真实的解释和模拟。传统的地下结构抗震分析方法主要包括地震系数法、反应位移法、围岩应变传递法等[2-4]。这些方法实际上都是拟静力法[5-7],具有计算简便的优点,但假定条件较多,无法精确考虑材料非线性非均质性和复杂边界变化等因素的影响,难以考虑地震作用下土体与结构之间的相互作用。随着计算机和计算理论的发展,以动力有限元法为代表的数值方法应运而生,它弥补了以上方法的缺陷,为各种复杂情况下地下结构抗震特性的全面深入研究提供了重要手段。本文在给定的地质和回填条件下开展某电站取水隧洞和热水回流沟衔接段三维地震响应分析,编制三维有限差分 FLAC3D 程序并结合五点公式计算衬砌结构的内力,绘出衬砌实体单元内力包络图,在此基础上研究衔接段混凝土结构的内力变化规律,为地下结构抗震设计提供依据。

1 工程概况

某电站机组通过两条直径为 5.5 m 的取水隧洞

基金项目:辽宁省教育厅科学技术研究项目(L2011216);大连市科学技术基金(2010J21DW013)

作者简介:赵杰(1980—),男,河北邢台人,讲师,博士,主要从事地下结构稳定与工程抗震研究。E-mail:zhaojie_gd@163.com

将水引至泵房,两隧洞的中心距为25.00~27.40 m。隧洞围岩为Ⅴ类片麻岩。根据工程需要,在隧洞出口与泵房前池闸门井间增设一道热水回流沟(图1)。热水通过热水回流沟,经隧洞顶部预留孔进入取水隧洞,随后进入泵房前池闸门井。衔接段采用碎石回填。鉴于取水隧洞工程的重要性,需专门对该段取水隧洞进行抗震分析。

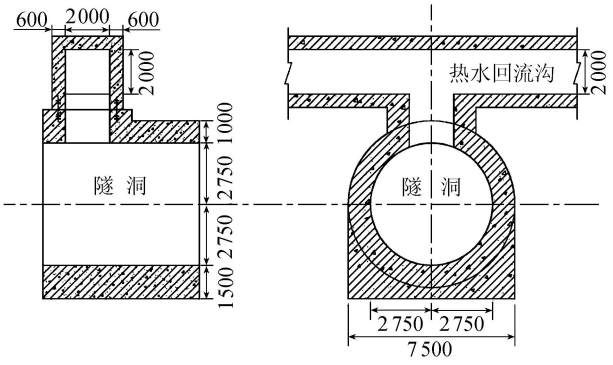


图1 热水回流沟(单位:mm)

2 衔接段抗震分析模型的建立

2.1 边界条件的设置

为准确模拟实际场地中地震波的传播过程,需在模型中设置人工边界。黏性边界是发展最早且简单实用的人工边界[8]。黏性边界最早由Kuhlmeyer和Lysmer[9-10]提出,是指在边界上施加法向和切向与边界无关的独立阻尼器,由阻尼器提供法向和切向黏性阻力,以此消除地震波在人为设置的模型边界上的反射效应,吸收或消耗传往边界外的波动能量,能比较真实地反映地震波的传播过程。黏性边界的黏性阻力计算公式为

$$t_n = -\rho C_p v_n \quad (1)$$

$$t_s = -\rho C_s v_s \quad (2)$$

式中:t_n、t_s 分别为法向和切向黏性阻力;ρ 为材料密度;C_p、C_s 分别为纵波和横波速度;v_n、v_s 分别为边界上速度法向和切向分量。

在模型各侧面的边界条件必须考虑没有地面结构的自由场。通过在模型四周生成二维和一维网格的方法来实现这种自由场的边界条件,柱体网格的侧边界通过阻尼器与自由场网格进行耦合,将自由场网格的不平衡力施加到主体网格的边界上。

在FLAC3D动力分析中,为准确模拟地震波的传播过程,空间单元尺寸必须小于输入波最高频率成分所对应波长的1/10~1/8。本次计算模型最大的网格宽度为9.25 m,可以考虑地震波主要频谱成分的影响。同时,数值模拟中采用局部阻尼,局部阻尼系数取0.157。

2.2 模型的建立

三维动力分析模型与静力模型计算范围一致,水平方向取5倍隧洞洞径,基岩深度自隧洞底部向下取50 m。模型宽135 m,长76 m,高82 m。计算时模型底部设为黏性边界,两侧采用能量透射边界。模型采用六面体单元,岩体本构模型采用mohr-coulomb弹塑性模型,采用null模型模拟隧洞的开挖,采用CABLE单元模拟系统锚杆和土钉。取水隧洞与热水回流沟衔接段结构模型见图2,三维静力和动力分析模型见图3。

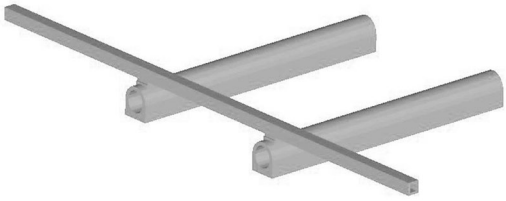


图2 取水隧洞与热水回流沟衔接段结构模型

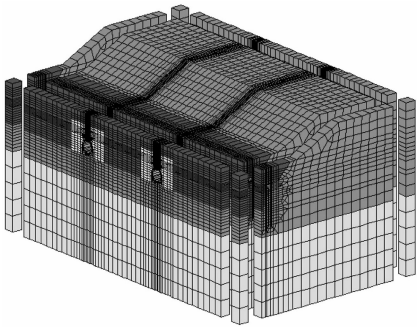


图3 三维静力和动力分析模型

2.3 地震波的选取

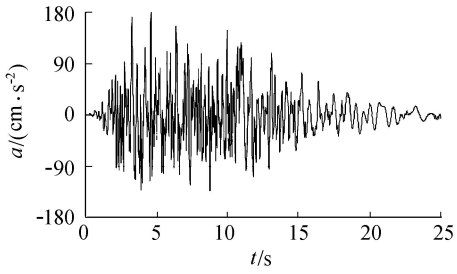
场地基岩输入采用该电站地震安全评价报告中的场址地震波,地震动荷载持时25 s,地震波时程曲线见图4。根据该电站地震安全性评价报告批准文件,场地基岩50 a超越概率10%的地震动荷载加速度峰值为0.1g,竖向加速度取水平向加速度的2/3。

2.4 计算参数

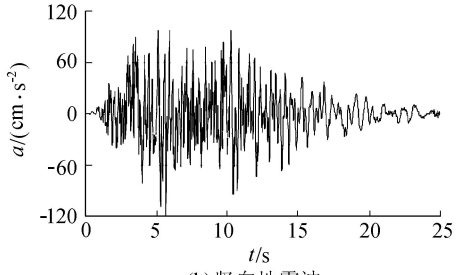
抗震分析计算参数根据该电站施工图设计阶段岩土工程详勘报告取值,列于表1中。根据该电站

表1 衔接段抗震分析计算参数

材 料	密度/(kg·m^{-3})	岩体黏聚力/kPa	岩体内摩擦角/(°)	弹性模量/GPa	泊松比	压缩波速/(m·s^{-1})	剪切波速/(m·s^{-1})	动弹性模量/GPa	动剪切模量/GPa	动泊松比	阻尼比/%
强风化片麻岩	2300	45	24	1.5	0.40	2069	925	5.2	1.90	0.37	5
C35混凝土	2500			31.5	0.17			31.5	13.85	0.17	5
回填碎石	1800	0	36	0.1	0.33			0.3	0.11	0.40	5



(a) 水平地震波



(b) 竖向地震波

图 4　场址地震波时程曲线

取水泵房温排水回热系统试验研究报告,内外温差取 6℃。

2.5　计算方案

具体计算时,综合考虑隧洞洞口的开挖回填以及热水回流沟的施工,建立整体三维分析模型。根据给定的设计方案开展抗震分析,分析地震动荷载作用下温度变化时结构的内力分布,为设计提供依据。利用 FLAC3D 计算分析地下结构截面上的内力分布规律时,如采用三维实体单元,截面形状虽能满足工程需求,但实体单元只给出了单元对应的位移及应力结果,无法直接得出相应截面上的内力(如弯矩、剪力和轴力),因此,需要对 FLAC3D 进行二次开发并结合五点公式计算衬砌结构的内力。式(3)~(5)分别为弯矩、剪力和轴力计算公式。式中应力一律用同一标号来代替,即轴力计算公式中 $\sigma_1 \sim \sigma_5$ 为所求轴力方向的应力,弯矩计算公式中 $\sigma_1 \sim \sigma_5$ 为所求弯矩方向的应力,剪力计算公式中 $\sigma_1 \sim \sigma_5$ 为所求剪力方向的应力。

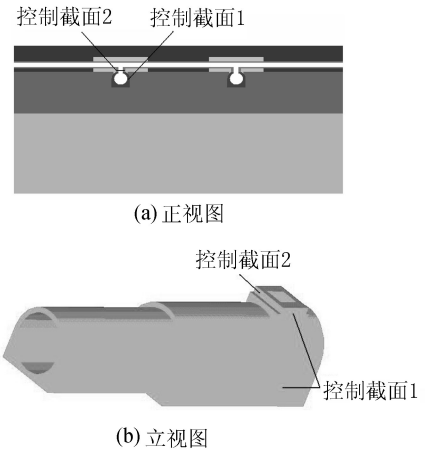
$$M = \frac{1}{96}(5\sigma_1 + 6\sigma_2 - 6\sigma_4 - 5\sigma_5)bh^2 \quad (3)$$

$$F = \frac{1}{8}(\sigma_1 + 2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4 + \sigma_5)bh \quad (4)$$

$$N = \frac{1}{8}(\sigma_1 + 2\sigma_2 + 2\sigma_3 + 2\sigma_4 + \sigma_5)bh \quad (5)$$

式中:M、F、N 分别为弯矩、剪力和轴力;σ_1、σ_2、σ_3、σ_4、σ_5 分别为截面高度方向第 1 个节点、第 2 个节点、第 3 个节点、第 4 个节点、第 5 个节点的应力;b 为截面宽度;h 为截面高度。

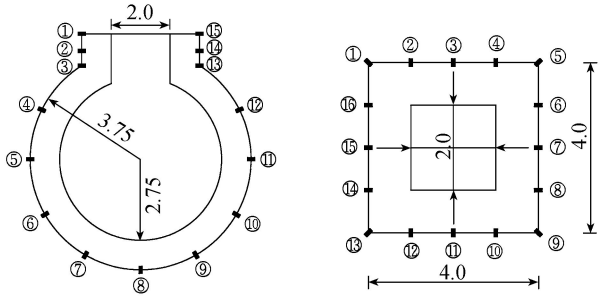
选取两个控制截面(图 5),获取不同位置处的结构内力及变形变化。控制截面 1 和 2 的控制点布置见图 6。



(a) 正视图

(b) 立视图

图 5　控制截面位置示意图



(a) 控制截面1　　(b) 控制截面2

图 6　控制截面控制点布置(单位:m)

3　结构抗震分析

在给定的设计地震动荷载作用下,进行衔接段接口处的地震响应分析,在此基础上绘制衬砌内力包络图(图 7),研究结构的内力分布。

3.1　抗震计算结果

a. 工况 1:设计地震作用,不考虑温度荷载。从图 7 可以看出,控制截面 1 最大弯矩绝对值为 267.8 kN·m,最大轴力绝对值为 4833.0 kN,最大剪力绝对值为 693.6 kN;控制截面 2 最大弯矩绝对值为 100.4 kN·m,最大轴力绝对值为 1 247.4 kN,最大剪力绝对值为 507.6 kN。

b. 工况 2:设计地震作用+温度荷载(内外温差 6℃)。从图 7 可以看出,控制截面 1 最大弯矩绝对值为 485.4 kN·m,最大轴力绝对值为 5 348.2 kN,最大剪力绝对值为 823.8 kN;控制截面 2 最大弯矩绝对值为 314.9 kN·m,最大轴力绝对值为 1 557.5 kN,最大剪力绝对值为 778.2 kN。

对比可以看出:在相同的荷载效应组合情况下,温度的改变对内力的影响较为显著,随着隧洞内水温的升高,衔接段内力显著增大;温度荷载不仅显著改变了隧洞和热水回流沟衔接段的内力大小,而且改变了某些部位的内力方向。

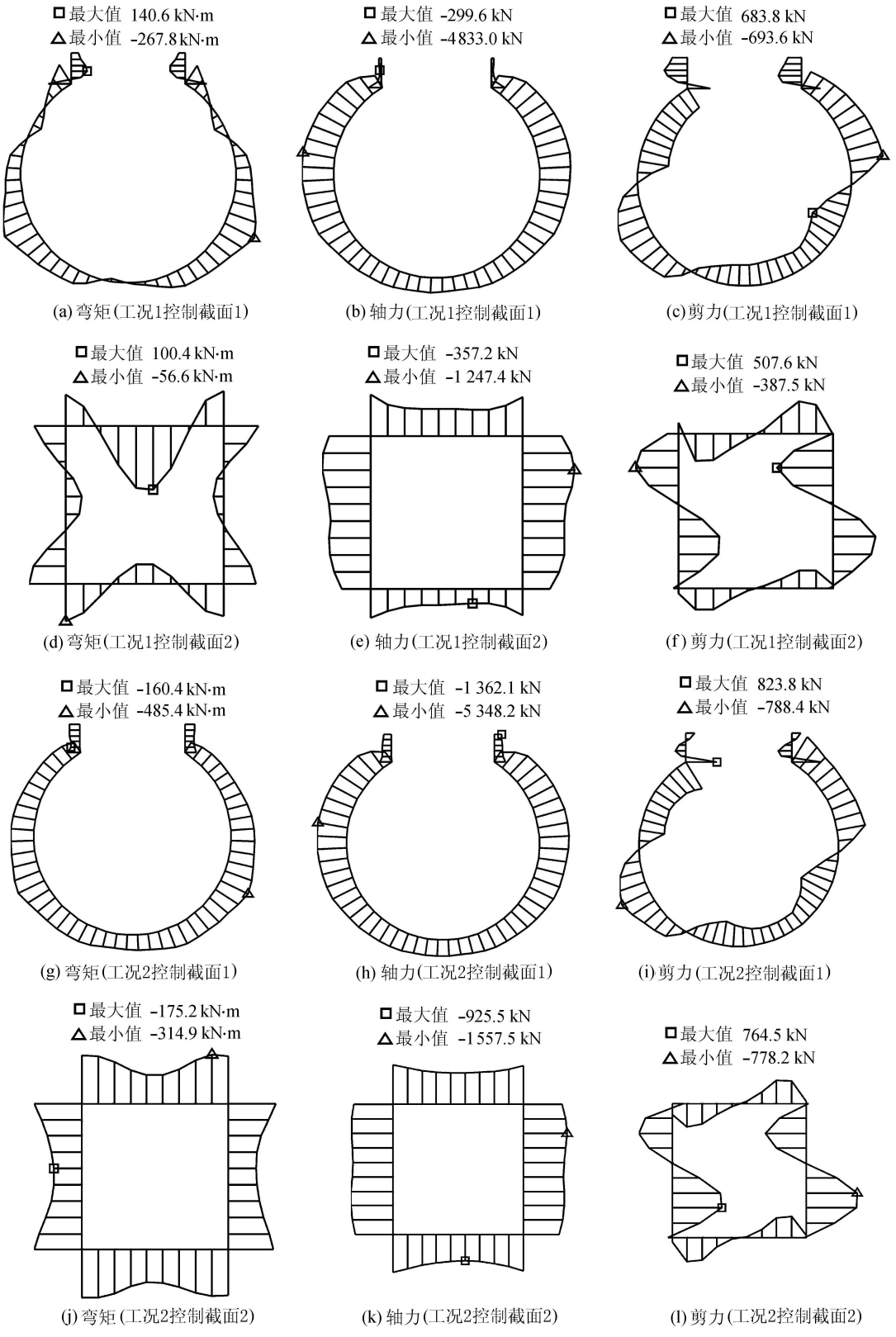


图 7　衬砌内力包络图

3.2　接口形状优化

在上述抗震分析中,取水隧洞与热水回流沟衔接口形状为方形,在优化设计分析中将接口形状改为圆形,将圆形接口的内力计算结果与方形接口的内力计算结果进行比较,为设计提供参考。计算结果见表 2,从表 2 可以看出,圆形接口的受力优于方形接口,方形接口的弯矩值比圆形接口的弯矩值高约 15%,说明圆形接口更合理。

4　结　语

利用三维有限差分软件 FLAC3D 开展某电站取水隧洞与热水回流沟衔接段地震响应分析,阐述了

表 2　两种不同接口形状衔接段内力最大值比较

接口形状	控制截面 1			控制截面 2		
	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN	弯矩/(kN·m)	轴力/kN	剪力/kN
方形	213.5	2097.7	823.8	314.9	1557.5	778.2
圆形	180.7	1663.9	534.9	282.0	1543.9	113.3

利用 FLAC3D 进行地下结构动力分析的关键性问题,针对场地地质特征和回填条件进行结构地震响应分析,在此基础上给出了衬砌内力包络图。结果表明:①在相同的荷载效应组合情况下,温度的改变对内力的影响较为显著;②温度荷载不仅显著改变了隧洞和热水回流沟衔接段的内力大小,而且改变了某些部位的内力方向;③圆形接口形状优于方形接口形状,方形接口的弯矩值比圆形接口的弯矩值高约 15%。该成果对类似地下工程抗震设计具有一定的参考价值。

参考文献:

[1] 刘晶波, 李彬. 地铁地下结构抗震分析及设计中的几个关键问题[J]. 土木工程学报, 2006,39(6):106-110. (LIU Jingbo, LI Bin. Issues on the seismic analysis and design of subway structures[J]. China Civil Engineering Journal, 2006, 39(6): 106-110. (in Chinese))

[2] 赵杰, 王桂萱, 裴强, 等. 核电厂取水隧洞抗震分析[J]. 世界地震工程, 2009, 25(3): 135-139. (ZHAO Jie, WANG Guixuan, PEI Qiang, et al. Seismic analysis of an intake tunnel for a nuclear power plant[J]. World Earthquake Engineering, 2009, 25(3): 135-139. (in Chinese))

[3] 赵杰, 王桂萱, 裴强, 等. 某核电厂取水隧洞不同设计方案抗震性能分析[J]. 防灾减灾学报, 2010, 26(1): 31-35. (ZHAO Jie, WANG Guixuan, PEI Qiang, et al. Seismic analysis of nuclear power project for intake tunnel under different design scheme[J]. Journal of Disaster Prevention and Reduction, 2010, 26(1): 31-35. (in Chinese))

[4] 赵杰, 王桂萱, 裴强, 等. 影响核电厂取水隧洞抗震性能的几个因素分析[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2011, 30(1): 46-49. (ZHAO Jie, WANG Guixuan, PEI Qiang, et al. Seismic analysis of nuclear power project for intake tunnel[J]. Journal of Liaoning Technical University, 2011, 30(1): 46-49. (in Chinese))

[5] SHUKLA D K, RIZZO P C, STEPHENSON D E. Earthquake load analysis of tunnels and shafts[C]// Proceeding of the Seventh World Conference on Earthquake Engineering. Michigan:[s. n.],1980:20-28.

[6] 孙钧,侯学渊. 地下结构:下册[M]. 北京:科学出版社, 1988:783-794.

[7] 郑永来, 杨林德, 李文艺, 等. 地下结构抗震[M]. 上海: 同济大学出版社, 2005.

[8] FLAC-3D (fast lagrangian analysis of continua in 3 dimensions) users manual[R]. Minneapolis, Minnesota: Itasca Consulting Group Inc.,2006.

[9] KUHLMEYER R L, LYSMER J. Finite element method accuracy for wave propagation problems[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1973, 99: 421-427.

[10] LYSMER J, KUHLMEYER R L. Finite dynamic model for infinite media[J]. Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE, 1969, 95: 859-877.

(收稿日期:2012-05-28　编辑:骆超)

(上接第 62 页)

[5] 肖波,李军. 船桥碰撞中桥墩防撞装置性能研究[J]. 水运工程,2010(3):17-20. (XIAO Bo, LI Jun. Study on pier protective device under collision of ship and bridge[J]. Port & Waterway Engineering,2010(3):17-20. (in Chinese))

[6] 高家镛,张甫杰,马雪泉. 桥梁防撞设施物理模型试验[J]. 上海船舶运输科学研究所学报,2011,34(1):1-7. (GAO Jiayong, ZHANG Fujie, MA Xuequan. Experiment on physical model of bridge anti-collision facilities[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute, 2011,34(1):1-7. (in Chinese))

[7] 金玉娟. 船桥碰撞风险评估与防撞设施研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2011.

[8] 姜金辉,金允龙,潘溜溜,等. 桥梁防撞研究技术与方法[J]. 上海船舶运输科学研究所学报,2008,31(1):23-27. (JIANG Jinhui, JIN Yunlong, PAN Liuliu. Techniques and methods in ship-bridge collision avoidance research[J]. Journal of Shanghai Ship and Shipping Research Institute,2008,31(1):23-27. (in Chinese))

[9] 肖波,鹿道凡. 船桥碰撞问题的有限元仿真分析[J]. 船海工程,2011,40(1):143-151. (XIAO Bo, LU Daofan. Finite element analysis of the collision between ship and bridge pier[J]. Ship & Ocean Engineering,2011,40(1): 143-151. (in Chinese))

[10] 颜海泉. 桥梁船撞有限元仿真分析[D]. 上海:同济大学,2004.

[11] 宁运琳,罗旗帜,刘夏平,等. 船舶撞击桥墩的非线性有限元数值仿真[J]. 广州大学学报:自然科学版,2011, 10(5):58-64. (NING Yunlin, LUO Qizhi, LIU Xiaping, et al. Non-linear finite element numerical simulation of ship-pier collision[J]. Journal of Guangzhou University: Natural Science Edition, 2011, 10(5): 58-64. (in Chinese))

[12] 石亦平,周玉蓉. ABAQUS 有限元分析与实例详解[M]. 北京:机械工业出版社,2006.

(收稿日期:2012-06-07　编辑:熊水斌)