

万州长江公路大桥防撞装置结构稳定性及通航净空尺度

林江¹,母德伟¹,余葵¹,刘洋¹,李俊²

(1. 重庆交通大学西南水运工程科学研究所,重庆 400016; 2. 长江上游水文水资源勘测局,重庆 400014)

摘要:为了研究万州长江公路大桥防撞装置的通航适应性,分别采用有限元软件 ABAQUS、物理模型试验等方法对该装置的结构稳定性及通航净空进行了分析。模型计算和试验结果表明,船舶撞击防撞带后,防撞带保持了较好的完整性,船舶也未出现擦刮大桥拱圈和自身翻覆现象,满足桥、船和防撞设施“三不坏”原则,防撞装置对大桥能进行有效地防撞保护。

关键词:防撞装置;结构稳定性;通航净空;万州长江公路大桥

中图分类号:U447

文献标志码:A

文章编号:1006-7647(2013)02-0059-04

Structural stability and navigable clearance of anti-collision device of Wanzhou Yangtze River Highway Bridge// LIN Jiang¹, MU Dewei¹, YU Kui¹, LIU Yang¹, LI Jun² (1. Southwest Hydraulic Engineering and Science Research Institute for Waterways, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400016, China; 2. Upper Yangtze River Survey Bureau of Hydrology and Water Resources, Chongqing 400014, China)

Abstract: In order to study its navigation adaptability, the structural stability and navigation clearance of an anti-collision device of the Wanzhou Yangtze River Highway Bridge were analyzed by means of the finite element software ABAQUS and a physical model. The calculated and experimental results show that the anti-collision belt maintains the structural integrity after being hit by a ship, and the ship can pass through the bridge safely without rubbing the bridge arch. Thus, the anti-collision device of the Wanzhou Yangtze River Highway Bridge can meet the security requirements of the ship and the bridge, as well as its own, and it can provide effective protection for the reservoir bridges.

Key words: anti-collision device; structural stability; navigable clearance; Wanzhou Yangtze River Highway Bridge

万州长江公路大桥位于重庆市万州主城区上游 7 km 黄牛孔处,处于三峡水库常年回水区,是国家“两纵两横”主干线之一的 318 线上跨长江的一座特大型桥梁,1994 年 5 月 1 日正式动工,1997 年建成通车。该桥为主跨 420 m 的钢筋混凝土上承式拱桥,全长 856.12 m,总宽 24 m,净矢高 84.0 m,净矢跨比 1/5,主拱圈高 7 m,宽 16 m,是同类桥梁中同期世界最大跨径的钢筋混凝土拱桥。

万州长江公路大桥为钢筋混凝土箱型拱桥,拱圈、立柱均采用矩形钢筋混凝土薄壁箱型结构,大桥自身顺水流方向抗撞能力较弱。三峡水库正常蓄水后,该桥位于三峡水库常年回水区,因拱脚高程较低(仅 152.59 m),随着三峡水库 175 m 蓄水运行,大部分时间内大桥拱圈将被部分淹没,桥下通航尺度进一步缩小。由于三峡蓄水后库区运行船舶载质量不断增大,一旦船舶失控或走偏航道碰撞拱圈和立柱,

将极易导致拱桥垮塌,引发极为严重的安全事故,为防止此类恶性事件的发生,万州长江公路大桥桥梁防撞装置的建设就显得尤为重要。万州长江公路大桥防撞设施采用弧形水上升降式防撞装置,本文通过结构分析、模型试验等方法,对该装置的通航适应性进行研究。

1 防撞装置结构及稳定性分析

历史上有大承台、人工岛等行之有效的防撞设施,对大桥起到了很好的保护作用;后来出现木栅、钢链和浮舟等设施,希望除了保护桥之外也保护船,但这些设施都比较易损坏。为了桥、船和防撞设施三者都不易损坏,就出现了会后退的外刚内柔的“三不坏”防撞装置^[1]。

万州长江公路大桥防撞设施工程采用弧形水上升降式防撞装置,该装置是一种新型的桥梁防撞装

置,其主要特点是独立于桥梁设置,对桥梁进行区域性防护,可随库区水位自适应升降,并满足“三不坏”防撞要求。

1.1 防撞装置结构

弧形水上升降式防撞装置主要由防撞带、浮筒与导向井三大部分组成^[2],如图 1 所示。该装置防护范围为最高通航水位时,大桥通航净高不足 18 m 的拱圈以及淹没的拱座和立柱。设计防撞带弧形结构半径为 106 m,跨径 210 m,矢高为 91.48 m,矢跨比 1 : 2.3,两岸防撞带沿桥轴线方向净距为 310 m。

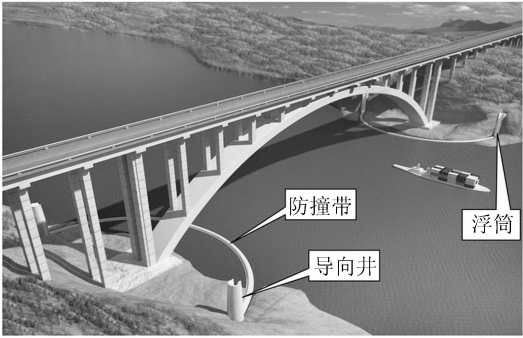


图 1 弧形水上升降式防撞装置三维示意图

防撞带为该装置的主体部分,为弧形中空双层钢管结构,具备自浮能力,外层钢管直径 4.0 m,浮出水面高度为 2.0 m,可吸收和传递船舶碰撞力。当船舶斜撞时可适当拨开船头,使船舶改变航行方向,减轻船舶受损程度,吸收船舶碰撞力,防止船舶进入桥梁保护区;当船舶正撞时可防船舶翻爬,利用自身缓冲特性减轻船舶受损程度,避免船舶进入桥梁保护区。

浮筒为鼓形中空多舱室全钢结构,固定于防撞带端部,置于导向井内,具备自浮能力,随水位变化沿导向井内壁升降。浮筒可缓冲防撞带传递的船舶碰撞力,在整个防撞装置中起平面约束、纵向导向作用。

导向井为开口式中空混凝土柱结构,通过对浮筒的平面定位与竖向导向,使防撞带在导向井开口位置处随水位升降,并承担、吸收和传导防撞带经由浮筒传递至导向井的作用力。

1.2 结构稳定性分析

目前,解决船桥碰撞问题的研究成果有经典的 Minorsky 理论、汉斯-德鲁彻理论、各种简化解析方

法、简化内部机理的数值解法、试验方法和有限元方法等^[3-8],其中有限元法可反映的碰撞物理现象最为完备,得到的计算结果也最为准确^[9-11]。由于本研究中船与防撞装置的碰撞问题涉及结构、材料以及船舶碰撞过程的非线性问题,因此模拟分析采用了以计算非线性问题见长的有限元软件 ABAQUS^[12]。

1.2.1 计算水流条件

根据三峡水库调度方案,水库汛期限制水位一般为 145 m,但对于大于 56 700 m³/s 的流量,按照三峡水库分级调度、补偿调节的方式,水库将开始蓄洪运用,保证沙市流量不超过 56 700 m³/s,在此情况下坝前水位将高于 145 m。汛后水库坝前水位逐渐蓄至 175 m。因此,为模拟实际使用时的最不利工况,计算水位为 151.8 m(三峡坝前水位 145 m 时桥位水位),流量 56 700 m³/s。

1.2.2 计算荷载

计算荷载组合主要考虑永久荷载、可变荷载及偶然荷载,其中,永久荷载包括结构自重和浮力,可变荷载包括风荷载、流水压力及波浪作用,偶然荷载为设计代表船舶撞击荷载。本文考虑船舶撞击防撞带的典型部位主要有拱顶、距拱顶 1/8 弧长处、距拱顶 1/4 弧长处、距拱顶 3/8 弧长处 4 个位置,如图 2 所示。

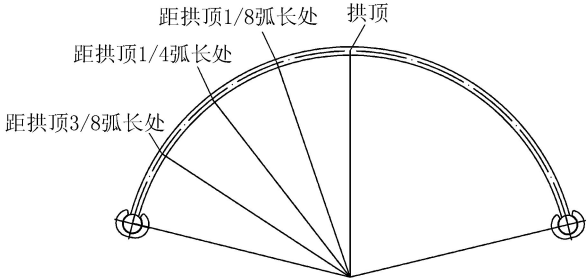


图 2 船舶撞击典型部位

1.2.3 计算模型与参数

万州长江公路大桥防撞设施共涉及 2 种混凝土材料和 2 种钢质材料,各材料基本参数见表 1。

万州长江公路大桥防撞装置设计船型标准为 5 000 t 级船舶,选用 5 000 t 级球鼻艏船舶作为计算代表船型,该船总长 110 m,型宽 19.2 m,吃水 4.3 m。5 000 t 级球鼻艏船舶有限元模型如图 3 所示,单元总数 58 019,节点总数 38 472。万州长江公路大桥防撞装置依据 1.1 节设计结构尺寸进行建模。

表 1 材料基本参数

材 料	弹性模量/ GPa	线膨胀 系数/10 ⁻⁵	密度/ (t · m ⁻³)	泊松比	标准强度/MPa		设计强度/MPa		屈服强度/ MPa	抗拉强度/ MPa	延伸 率/%
					抗压	抗拉	抗压	抗拉			
C35 混凝土	31.5	1.0	2.50	0.2	23.40	2.20	16.70	1.57			
C50 混凝土	34.5	1.0	2.40	0.2	32.40	2.64	23.10	1.89			
Q345D 高强结构钢	210.0	1.2	7.85	0.3					≥345	≥510	12
Q450NQR1 钢	210.0	1.2	7.85	0.3					≥450	≥550	19

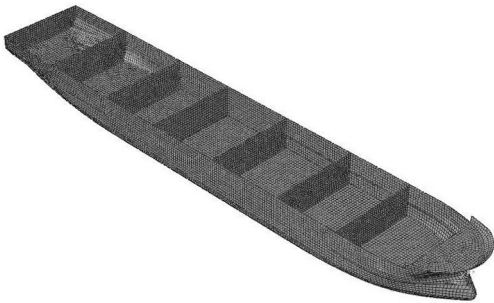


图3 5000 t 级球鼻船舶有限元模型

1.2.4 计算结果

根据有限元模型计算结果,5000 t 级球鼻船舶撞击防撞带时,由于船舶撞击冲量较大,防撞带产生较大的塑性变形,最大变形位移为 5.03 m,防撞带通过结构变形,吸收了船舶的大部分能量。防撞带所用 Q345D 钢的最大 Mises 应力为 445 MPa,未超出 Q345D 钢的抗拉强度,说明设计的防撞带在 5000 t 级船舶撞击力作用下产生较为强烈的塑性变形,但未出现断裂现象,仍能对大桥进行有效保护,满足防撞装置自身结构稳定要求。表 2 和图 4 分别为 5000 t 级球鼻船舶下行撞击右岸防撞带计算结果和应力云图。

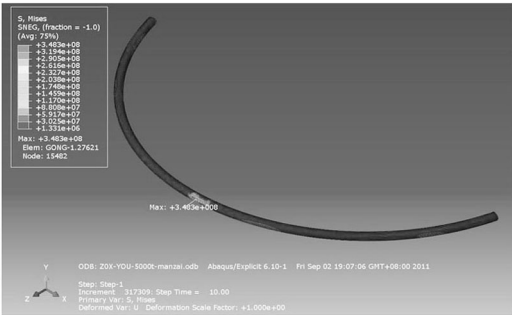
表 2 5000 t 级球鼻船舶下行撞击右岸防撞带计算结果						
撞击位置	撞击速度/ (m · s ⁻¹)	撞击角度/ (°)	最大应力/MPa		撞击反力/ MN	撞击处位移/m
			外管	内管		
拱顶处	5.53	16	348.3	185.0	8.50	1.274
距拱顶 1/8 弧长处	5.49	16	445.0	393.9	9.68	3.410
距拱顶 1/4 弧长处	4.22	16	415.2	400.1	9.17	5.030

2 通航净空尺度

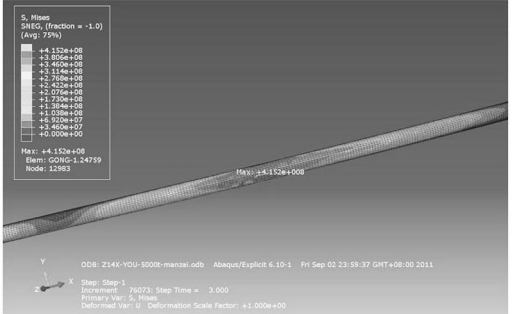
2.1 通航净高

万州长江公路大桥桥区河段航道等级为 I-(2),考虑三峡水库运行 100 a 泥沙淤积的基础上,桥区处最高通航水位(20 年一遇洪水)为 174.22 m。根据 GB 50139—2004《内河通航标准》,I-(2)级航道水上过河建筑物需满足通航净高 18 m、侧高 7 m 的要求。由于防撞带为浮式结构,且船体外形为上宽下窄的光滑流线型,船首还具有上倾下凹的结构特点,失控船舶有部分船体进入防撞带防护范围内的风险,因此 GB 50139—2004《内河通航标准》对侧高的规定在这种情况下并不适用。

图 5 为万州长江公路大桥防撞方案立面布置,可以看出,最高通航水位 174.22 m 时,桥下通航净高大于 18.42 m,满足 GB 50139—2004《内河通航标准》I-(2)级航道通航净高 18 m 的要求。



(a) 拱顶处



(b) 距拱顶1/4处

图4 5000 t 级球鼻船舶下行撞击右岸防撞带应力云图

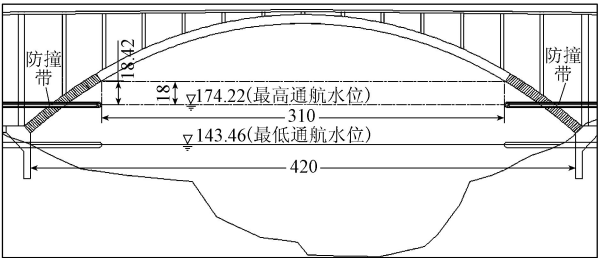


图5 防撞方案立面布置(单位:m)

2.2 通航净宽

万州长江公路大桥位于水库常年回水区,枯水期坝前水位蓄至 175 m 时,工程河段通航水流条件好,但桥下通航净空尺度最小;汛期坝前水位降至防洪限制水位 145 m 时,工程河段通航水流条件相对较差,对通航净宽的需求最大。表 3 为上述两种情况下桥下通航净宽需求,计算公式参见 GB 50139—2004《内河通航标准》附录 C。

表 3 不同船舶及船队组合情况下通航净宽分析

船舶及船队 组合情况	坝前 水位/m	通航净宽需求/m		通航条件
		单向	双向	
5000 t 级单船组合	175	60.1	119.4	满足双向
	145	100.3	194.3	
5000 t 级单船与 大型船队组合	175		234.2	满足交会
	145		309.1	
大型船队组合	175	160.0	320.0	仅满足单向
	145	187.0	374.0	

注:大型船队采用 GB 50139—2004《内河通航标准》I-(2)级航道 3 排 3 列代表船队,尺度为长 316.0 m、宽 48.6 m、吃水 3.5 m。

万州长江公路大桥防撞工程建成后,各级水位条件下两岸防撞带沿桥轴线方向净距为 310 m,由

表3可知可满足5000t级单船双向通航、5000t级单船与大型船队的交会及大型船队单向通航净宽要求。为确保桥区河段船舶航行安全及大桥自身安全,应禁止大型船舶在大桥水域交会。

2.3 自航船模与防撞设施碰撞试验

为了进一步研究船舶与防撞带撞击后,万州长江公路大桥通航净空尺度方案是否合理,以及防撞设施运行的稳定性和可靠性等因素,采用自航船模和整体水工模型相结合的方式(模型比尺为1:100)研究不同通航水流条件下,不同船型撞击防撞带的典型部位时,防撞带的防撞效果和船舶的状态。

根据模型试验结果,当枯水期三峡水库坝前水位175m,遇同期百年一遇洪水(流量28400m³/s,桥位水位174.22m)时,5000t级单船可安全通过防撞带拱顶附近水域而不至于擦刮大桥拱圈,即使遇到轻载或空载情况也可采取临时倒桅等措施避免船舶上层建筑擦刮大桥拱圈,如图6所示。

在流量28400m³/s、桥位水位174.22m(最高通航水位)和流量56700m³/s、桥位水位151.80m(通

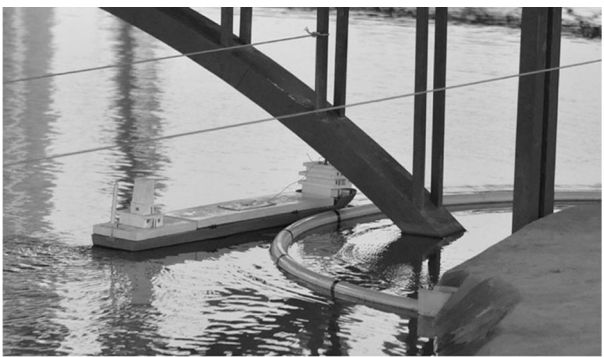


图6 5000t级单船撞击拱顶

航水流条件最差)两种典型工况下,船舶撞击防撞带后航行情况如表4所示。从表4可以看出,各种工况下船舶均未出现擦刮大桥拱圈和自身翻覆现象,仅在1000t级自航货船分别碰撞防撞带距拱顶1/4和3/8弧长处时,船舶会略为斜向上爬或径向上爬至防撞带上部4~12m(船身长度),但均不会出现翻覆或是接触大桥拱圈的情况,不会危及大桥安全,且防撞带也保持了较好的完整性,满足自身结构稳定要求。

表4 船舶撞击防撞带后船舶运行状态统计

流量/ (m³·s ⁻¹)	水位/m	航向	船型	拱顶处	距拱顶1/8弧长处	距拱顶1/4弧长处	距拱顶3/8弧长处
28400	174.22	下行	5000t级(满载)	轻擦下行	略转向下行	略后退,转向下行	几乎正撞,撞击后后退
			5000t级(轻载)	轻擦下行	略转向下行	略后退,转向下行	几乎正撞,撞击后后退
			1000t级(满载)	轻擦下行	稍有侧倾,略转向下行	略为斜向上爬4~5m	几乎正撞,上爬8~10m
56700	151.80	下行	5000t级(满载)	轻擦下行	略转向下行	略后退,转向下行	几乎正撞,撞击后后退
			5000t级(轻载)	轻擦下行	略转向下行	略后退,转向下行	几乎正撞,撞击后后退
			1000t级(满载)	轻擦下行	稍有侧倾,略转向下行	略为斜向上爬5~6m	几乎正撞,上爬10~12m

3 结 论

a. 万州长江公路大桥为钢筋混凝土箱型拱桥,处于三峡水库常年回水区,随着三峡水库坝前蓄水位的抬高,桥下通航尺度不断缩小,为防止失事船舶撞击拱圈引发严重的安全事故,万州长江公路大桥桥梁防撞装置的建设极为重要。

b. 万州长江公路大桥防撞设施工程采用弧形水升降式防撞装置,可随库区水位自适应升降,有限元软件ABAQUS计算结果表明,设计5000t级船舶撞击防撞带后,仍保持了防撞带较好的完整性,满足防撞装置自身结构稳定要求。

c. 万州长江公路大桥防撞装置建成后,满足GB50139—2004《内河通航标准》I-(2)级航道通航净高18m的要求,以及5000t级单船与大型船队的交会要求。自航船模和整体水工模型相结合的试验也表明船舶撞击防撞带后,船舶均不会出现擦刮大桥拱圈和自身翻覆现象,满足“三不坏”防撞要求。

参考文献:

[1] 陈国虞. 防御船撞桥的桥墩防撞装置[J]. 航海技术, 2001(1):23-24. (CHEN Guoyu. Pier protective device of defending ship and bridge collision [J]. Marine Technology, 2001(1):23-24. (in Chinese))

[2] 余葵,刘洋,吴俊,等. 弧形水升降式桥梁防撞装置防撞能力研究[J]. 四川大学学报:工程科学版,2012,44(3):31-35. (YU Kui, LIU Yang, WU Jun, et al. Preliminary study on the crash capability of round bridge anti-collision setting which lifts up and down with water level [J]. Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition, 2012, 44(3):31-35. (in Chinese))

[3] MINORSKY V U. An Analysis of ship collision to protection of nuclear powered plant[J]. Ship Research, 1959(1):1-4.

[4] 何栋梁,范彬. 船桥碰撞及防撞结构研究[J]. 石河子大学学报:自然科学版,2005,23(6):742-745. (HE Dongliang, FAN Bin. Studies on ship-bridge collision and protection structure of bridge [J]. Journal of Shihezi University: Natural Science, 2005, 23(6):742-745. (in Chinese))

(下转第77页)

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))

(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

[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] KUHLMAYER 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, KUHLMAYER 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)

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]. 航海工程,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)