

文章编号: 1674-599X(2020)04-0088-06

桥墩防撞等级评估方法及其应用

刘意¹, 王国华², 李年航², 彭建新¹

(1. 长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114; 2. 广佛高速公路有限公司, 广东 广州 510000)

摘要: 为评估现有桥梁的防撞等级, 设置防撞措施, 降低船撞桥事故的风险概率。以雅瑶大桥为工程背景, 通过 Midas 有限元软件, 建立桥墩受力模型; 结合混凝土强度破坏理论, 计算桥墩承载力; 利用船撞力计算公式, 计算船舶撞击力; 依据 Aashto 提出的计算方法, 计算桥梁的倒塌概率。计算结果表明: 雅瑶大桥通航孔的 9[#]和 10[#]桥墩均为低风险, 该方法评估船桥碰撞风险可行, 可为其他桥梁的设计和船舶安全通航提供依据。

关键词: 船桥碰撞; 有限元模型; 风险评估

中图分类号: U443.22 **文献标志码:** A

DOI:10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.2020.04.013

Assessment method and application of anti-collision grade of bridge pier

LIU Yi¹, WANG Guo-hua², LI Nian-hang², PENG Jian-xin¹

(1. School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Guang of Expressway Co., Ltd., Guangzhou 510000, China)

Abstract: In order to evaluate the collision prevention level of existing bridges and guide the setting of collision prevention measures, to reduce the risk probability of ship-bridge collision accidents. This paper is based on Yayao Bridge, the bridge pier stress model is established by Midas finite element software, and the bearing capacity of the bridge pier is calculated based on the theory of concrete strength failure. The ship collision force is calculated by ship collision force formula, and bridge collapse probability is calculated according to Aashto code. The calculation results show that the navigation hole No. 9 and No. 10 piers of Yayao Bridge are of low risk. This method can provide a basis for the design of other bridges and safe navigation of ships.

Key words: ship bridge collision; finite element model; the risk assessment

中国现有公路桥梁 80 万余座, 铁路桥梁也已超过 20 万座。桥梁数量和船舶通行量持续增加, 船舶撞击桥梁事故成为航道桥梁倒塌的主要原因之一。1987—2008 年, 中国船舶撞击桥梁事故发生 21 起, 平均每年 1 起^[1]。根据戴彤宇^[2]的研究结果, 船桥撞击事故数仍呈上升趋势。因此, 桥梁的防撞等级评估和防撞方案设计, 已成为桥梁工程设计关注的问题。

目前, 针对船桥碰撞风险的评估进行了一些研究, Aashto^[3]提出了设计船舶类型的确定, 碰撞概

率的分析, 碰撞力的计算, 船舶破损长度的计算, 以及桥墩防撞保护系统设计等。虽然采用了基于风险的设计思想, 但其通航船舶特征、可接受风险水平等因素, 不符合中国的实际情况。中国根据《公路桥涵设计通用规范(JTJ D60—2015)》^[4]对船舶进行了分类。同时, 分别根据航道等级和通航情况给出了船舶撞击力。虽然根据不同的航道和通航情况给出了船舶撞击力, 但是桥墩防撞的研究还有很多不足^[5], 对发生概率很低的船桥碰撞风险事件, 没有明确的处理方法, 其设计理念有待完善。国内外

收稿日期: 2020-03-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52078056); 湖南省教育厅重点项目(18A136)

作者简介: 刘意(1996-), 男, 长沙理工大学硕士生。

许多学者对船舶撞击力也进行了大量研究。Woisin^[6]等人对船头碰撞进行了一系列试验, 提出了船头碰撞的等效撞击力估算方法。Pedersen^[7]等人提出了船舶碰撞模拟的二维方法。梁文娟^[8]等人将 Pedersen 船舶模拟的二维方法推广到了三维。陈诚等^[9-10]人利用有限元法进行了碰撞数值模拟, 分析了船舶在不同质量、吨位速度、角度和碰撞形式等因素对碰撞力的影响, 得出了船撞承台撞击力的简化计算公式。作者以雅瑶大桥为工程背景, 拟利用有限元软件建立桥墩受力模型, 对该桥桥墩进行防撞风险等级评估, 以期对其他桥梁的设计和船舶安全通航评估提供依据。

1 防撞风险评估方法

1.1 桥墩最大容许撞击力

1) 建立有限元模型

运用 Midas Civil 软件, 建立有限元分析模型^[11]。分别计算桥墩受到 1 000 kN 的横桥向、顺桥向水平撞击力时, 桥墩最危险截面处产生的内力^[12]。由于船舶尖端一般高出水面 1.5 m, 因此, 撞击位置可取设计通航水位+1.5 m 处。设桥墩初始加载 1 000 kN 水平船撞力, 可以得到桥墩内力 F 。根据线性叠加原理, 当桥墩受到船撞力 P 作用时, 船撞力在各桥墩截面处产生的内力为:

$$F' = \frac{P}{1000} \times F \quad (1)$$

式中: F' 为模型中桥墩危险截面的极限承载力, kN; P 为船撞力, kN; F 为桥墩的内力, kN。

桥墩危险截面的极限承载力 F' , 可通过桥墩配筋比计算出, 即: 根据式(1)反算出桥墩所能够承受最大船撞力 P , 其计算式为:

$$P = \frac{F'}{F} \times 1000 \quad (2)$$

2) 桥墩承载力的计算

钢筋混凝土的抗弯能力, 可通过 Midas 软件中弯矩与曲率的关系来确定, 即核心混凝土强度达到极限压应变或纵向受力钢筋达到极限拉应变。桥墩截面和桩柱截面的抗弯能力, 可采用 Midas 自带的弯矩-曲率曲线计算功能进行计算。混凝土回滞模型采用 Kent-Park 模型进行计算。

3) 按桥墩抗剪能力计算桥墩承载力

当砌体结构或混凝土结构直接承受剪力时, 可以按式(3)进行计算:

$$\gamma_0 V_d \leq A f_{Vd} + \frac{1}{1.4} \mu_f N_K \quad (3)$$

式中: γ_0 为重要性系数; V_d 为剪力设计值; A 为桥墩截面面积; f_{Vd} 为混凝土抗剪强度设计值; μ_f 为摩擦系数, 取 $\mu_f=0.7$; N_K 为受剪截面垂直压力值^[13]。

4) 对比各抗力计算结果选取控制抗力

将计算出的桥墩、桩的截面极限抗弯值和极限抗剪力值作为 F' , 并将桥墩所受顺桥向和横桥向的内力值作为 F 代入式(2), 即可得出各墩柱和桩柱所能抵抗的最大水平船撞力。

1.2 船舶撞击力计算

船撞力按文献[9]的平均船撞力公式进行计算:

$$P_g = \eta_3 \gamma_3 \xi_3 (0.016V + 0.0117)(D_{WT})^{0.64} \quad (4)$$

式中: P_g 为总体平均船撞力, MN; D_{WT} 为船的装载吨位; V 为船舶撞击桥墩时的速度, m/s; η_3 为承台厚度修正系数; γ_3 为碰撞角度修正系数; ξ_3 为承台圆弧半径修正系数。

各系数的确定分别为:

$$\eta_3 = 1 - \exp\left(-\frac{4.7H_t}{H_S}\right) \quad (5)$$

式中: H_t 为桥墩承台的高度, m; H_S 为船舶的高度, m; 当 $H_t/H_S \geq 1.0$ 时, $\eta_3 = 1.0$ 。

$$\gamma_3 = C_2 \gamma_1 \quad (6)$$

$$\gamma_1 = k \cos \theta + 1 - k \quad (7)$$

$$k = a_0 \left(\frac{1}{D_{WT}}\right)^{b_0} \quad (8)$$

式中: θ 是碰撞角度, 取值范围为 $\theta \in [0, 90]$ 。 a_0, b_0 分别是拟合曲线方程的系数和指数, 对于法向撞击力, $a_0=28.64$, $b_0=0.40$; 对于撞击合力, $a_0=51.57$, $b_0=0.48$ 。 C_2 为总体平均撞击力与其最大撞击力的比值, 对于法向撞击力: $C_2=0.64$; 对于撞击力合力: $C_2=0.65$ 。

$$\xi_3 = 0.596R^{0.08} \quad (9)$$

式中: R 为承台圆弧面的半径, m。

1.3 桥墩撞击风险分析

对比桥墩抗撞与船舶撞击力, 计算桥墩受到船

船舶撞击时的倒塌概率。依据 Aashto 提出的计算方法计算船撞桥概率^[3]。

1) 船舶撞击桥墩的倒塌概率

基于桥墩强度和船舶撞力的比值，计算桥梁倒塌概率 P_C ， P_C 是根据桥梁的极限抗力 H 与船舶撞击力 P 的比值来确定的。其中， H 表示桥墩的抗力 H_P 或者为桥梁的上部结构抗力 H_S ， P 表示船舶撞击桥墩时的正撞力 P_S 、船舶撞击桥梁上部结构时的撞击力 P_{BH} 、甲板撞击上部结构时的撞击力 P_{DH} 或者桅杆撞击下部结构时的撞击力 P_{MT} 。根据式(10)，(11)可得出横桥向撞击和顺桥向撞击桥墩的船舶撞击倒塌概率。

$$P_C = \begin{cases} 0.1+9 \times (0.1-H/P), & 0 \leq H/P < 0.1; \\ 0.111 \times (1-H/P), & 0.1 \leq H/P < 1.0; \\ 0, & H/P \geq 1.0. \end{cases} \quad (10)$$

2) 船舶碰撞概率

依据 Aashto 提出的风险分析方法 II，计算年倒塌频率模型^[13]，可得船撞概率计算式为：

$$P = P_A \times P_G \quad (11)$$

式中： P_A, P_G 分别为偏航概率、几何概率。

其中，偏航概率 P_A 按式(12)进行计算：

$$P_A = B_R \times R_B \times R_C \times R_{XC} \times R_D \quad (12)$$

式中： B_R 为偏航基准概率，对于普通的船舶，取 $B_R = 0.6 \times 10^{-4}$ ；对于驳船，取 $B_R = 1.2 \times 10^{-4}$ 。 R_B 为桥位修正系数，当桥区处的航道为直线形时，取 $R_B = 1.0$ ；当桥区处的航道转向点与桥梁的距离 $< 910 \text{ m}$ 时， $R_B = 1 + \theta/45^\circ$ (其中， θ 为航道转角或航

道弯曲角度)；当桥区处航道转向点与桥梁的距离在 $910 \sim 1\,920 \text{ m}$ 时， $R_B = 1 + \theta/90^\circ$ 。 R_C 为平行水流修正系数， $R_C = 1 + V_C/19$ (其中， V_C 为与航线方向平行的水流流速)。 R_{XC} 为横流修正系数， $R_{XC} = 1 + 0.54V_{XC}$ (其中， V_{XC} 为与航线方向垂直的水流流速)。 R_D 为修正后的船舶交通密度系数，依据《桥梁船撞设计指南》^[3] 中的规定，密度低时， $R_D = 1.0$ ；平均密度时， $R_D = 1.3$ ；密度高时， $R_D = 1.6$ 。

对于几何概率 P_G 的取值，Aashto^[3] 提出了正态分布模拟偏航船舶接近桥墩时的航线。假设标准差 σ 为船舶总长度，其阴影部分面积为几何概率 P_G ，如图 1 所示。

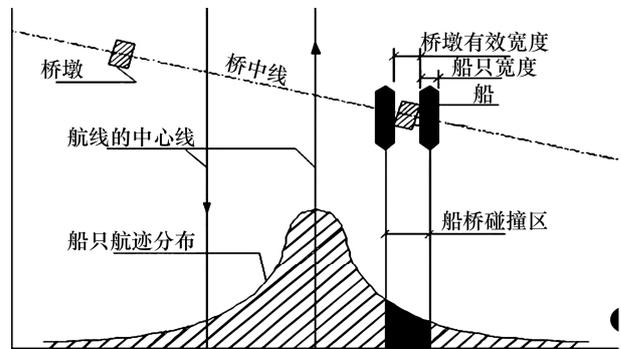


图 1 船舶撞击桥梁几何概率计算示意

Fig. 1 geometric probability calculation of bridge ship by

1.4 桥墩防撞等级评定

根据文献[10]的桥梁船撞倒塌风险等级评价标准，对该桥的桥墩进行防撞等级评定。桥梁船撞倒塌风险等级评价标准见表 1。

表 1 船撞桥倒塌风险等级评估和处理建议

Table 1 Assessment and treatment of bridge collapse risk

年失效频率 P_f	风险等级	建议
$P_f > 1 \times 10^{-3}$	高风险	风险不可接受，建议更改设计方案或采取防撞措施
$5 \times 10^{-5} < P_f < 10^{-3}$	中风险	风险不可接受，建议采用降低风险的方法或改进桥梁设计方案
$5 \times 10^{-7} < P_f < 5 \times 10^{-5}$	低风险	风险可以接受，注意风险管理和监控
$P_f < 5 \times 10^{-7}$	可忽略风险	风险可以接受，不必进行风险管理和监控

2 算例

2.1 工程概况

雅瑶大桥位于广佛高速公路的一座预应力混凝土简支 T 梁桥，其跨度为 $5 \times 30 \text{ m}$ ，设计通航水位为 $+2.0 \text{ m}$ 。桥墩形状如图 2 所示，通航孔的 9# 桩

高 $H_{9\#}$ 为 $1\,616 \text{ cm}$ ，墩高 $h_{9\#}$ 为 406.3 cm ；10# 桩高 $H_{10\#}$ 为 $1\,678 \text{ cm}$ ，墩高 $h_{10\#}$ 为 410.1 cm 。

2.2 桥墩最大容许撞击力计算

1) 采用 Midas Civil 建立桥墩模型，9#、10# 墩受 $1\,000 \text{ kN}$ 有限元计算模型如图 3 所示。当桥梁左侧桥墩受到横桥向单位船舶撞击力 $1\,000 \text{ kN}$ 时，被撞击的墩和桩受到撞击时，产生的最大内力见表 2。

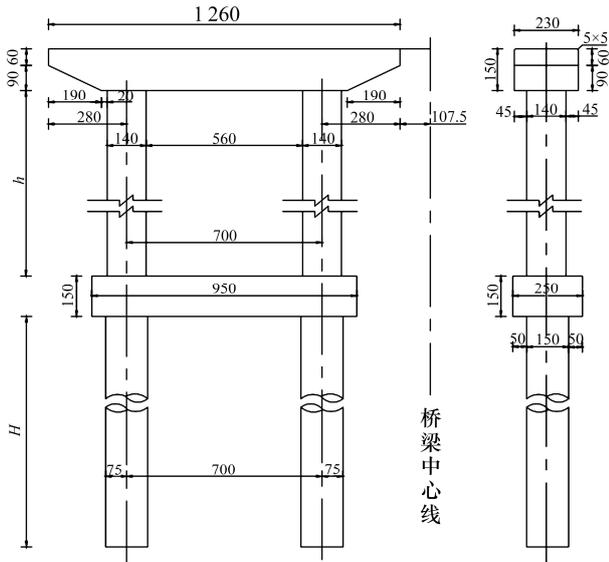


图 2 雅瑶大桥桥墩立面(单位: cm)

Fig. 2 Elevation of piers of the Yayao bridge (unit: cm)

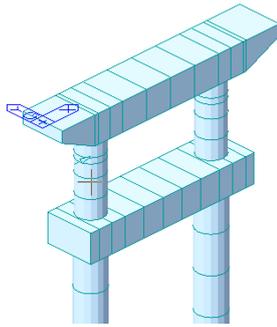


图 3 9#、10#墩横桥向 1 000 kN 作用有限元计算模型

Fig. 3 Finite element calculation model of transverse bridge the on No 9-10 pier with the action 1 000 kN

表 2 正撞时桥墩内力

Table 2 Internal force of the hitting bridge pier

部位	横桥向			部位	顺桥向		
	弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	剪力/ kN		弯矩/ (kN·m)	轴力/ kN	剪力/ kN
9#左墩	1 035	194	684	9#左墩	1 463	0	848
9#右墩	736	194	316	9#右墩	1 237	0	152
9#左桩	1 854	1 152	489	9#左桩	3 455	0	1 000
9#右桩	2 013	1 152	511	9#右桩	4 061	0	468
10#左墩	232	20	89	10#左墩	680	0	94
10#右墩	485	50	89	10#右墩	680	0	94
10#左桩	1 407	690	534	10#左桩	2 905	0	1 000
10#右桩	1 289	690	466	10#右桩	2 905	0	488

当桥梁左侧桥墩受到顺桥向单位船舶撞击力 1 000 kN 时, 被撞击的墩和桩上所产生的内力见表 2。

2) 按桥墩混凝土强度破坏计算桥墩承载力
依据弯矩-曲率曲线关系, 确定钢筋混构件的

表 3 桥墩与桩抗撞能力值

Table 3 Value of anti-collision ability of bridge piers and pile

撞击方向	桥墩 部位	水平撞击力容许值/kN	
		强度验算	抗剪强度
横桥向	9#墩	3 389	6 287
横桥向	9#桩	2 265	9 573
横桥向	10#墩	7 232	48 315
横桥向	10#桩	3 240	9 161
顺桥向	9#墩	2 398	5 071
顺桥向	9#桩	1 123	4 892
顺桥向	10#墩	5 159	45 745
顺桥向	10#桩	1 570	4 892

抗弯能力。依据 Kent-Park 模型计算混凝土滞回, 混凝土屈服应变取 0.002。依据 Menegotto-Pinto 模型计算钢筋滞回, 计算得出桥墩截面的抗弯值为 3 508 kN·m, 桩截面的抗弯值为 4 560 kN·m。

3) 按桥墩抗剪能力计算桥墩承载力

依据式(3), 其中: $f_{vd}=2.6$ MPa, $N_k=596$ kN, 可计算桥墩的抗剪值为 4 300 kN, 桩的抗剪值为 4 892 kN。

4) 对比各抗力计算结果, 选取控制抗力(水平撞击力容许值)

把计算出的 9#、10#桥墩和桩截面的极限抗弯与抗剪值当做 F' , 将表 2 中的弯矩和剪力值代入式(2)中的 F , 即可得出各墩柱和桩柱所能抵抗的最大水平船撞力, 见表 3。

由表 3 可知, 横桥向桥墩抵抗船撞的水平抗力由 9#桥墩桩的强度控制, 为 2 265 kN; 顺桥向桥墩抵抗船撞水平抗力由 9#桥墩桩强度控制, 为 1 123 kN。

2.3 船舶撞击力计算

根据雅瑶大桥的实际情况, 设计通航水位条件下以 4.1 m/s 的速度与桥墩撞击时计算 500 D_{WT} 级的货船所产生的撞击力。计算横桥向撞击力时, 船舶撞击桥方向与桥轴线垂直; 计算顺桥向撞击力时, 船舶撞击桥方向与桥轴线的夹角为 45°。根据式(4), 计算得到横桥向撞击力为 2 129 kN, 顺桥向撞击力为 464 kN, 横桥向大于桥墩控制撞击力, 顺桥向小于桥墩控制撞击力。

2.4 桥墩的撞击风险分析

1) 一次倒塌概率计算

根据式(8), 计算得到横桥向撞击和顺桥向撞击

作用下的 9[#]、10[#]桥墩的船舶撞击倒塌概率见表 4。

表 4 9[#]、10[#]桥墩船舶撞击倒塌概率

Table 4 Collapse probability of ship collision of the 9[#] and 10[#]

撞击位置	桥墩	极限抗力/kN	撞力/kN	倒塌概率/ ($\times 10^{-4}$)
横桥向	9 [#]	2 265	2 129	1.110
横桥向	10 [#]	3 240	2 129	0.220
顺桥向	9 [#]	1 123	464	0.075
顺桥向	10 [#]	1 570	464	0.021

2) 船桥碰撞概率计算

雅瑶大桥的通航孔宽度为 30 m, 桥墩的直径为 1.4 m, 船舶总长度为 60 m, 船舶宽度为 10 m。因雅瑶大桥过往船只仅为单一船舶, 并无船队通航, 所以偏航基准概率 B_R 取 0.6×10^{-4} 。与航线方向平行的水流速度 R_C 取 1 m/s, 垂直于航线方向的水流速度取 0.2 m/s。依据雅瑶大桥的通航资料, 取修正后的交通密度系数 R_D 为 1.3。桥位处的河道比较顺直, 桥位修正系数 R_B 为 1。根据式(10), 计算可得船桥的碰撞概率为 6.66×10^{-6} 。

2.5 年倒塌频率计算

雅瑶大桥 500 D_{WT} 船舶的通航量约为 5 000 艘/年。其中, 年倒塌频率 $A_F = N \times P_A \times P_G \times P_C$, 所以可算得雅瑶大桥 9[#]、10[#]墩的年倒塌频率分别为 3.95×10^{-6} 、 8.03×10^{-7} 。根据表 1 可知, 雅瑶大桥通航孔 9[#]和 10[#]桥墩均为低风险, 虽然该风险水平可以接受, 但是需注意船桥碰撞风险的监测和管理。

3 结论

以雅瑶大桥为工程背景, 采用 Midas Civil 建立了桥墩有限元模型。基于混凝土强度破坏理论, 计算桥墩最大容许撞击力。利用陈诚^[9]提出的船撞力公式计算船舶撞击力, 提出了基于船桥碰撞风险评估的方法, 得到的结论为:

1) 依据 Asshto 提出的公路桥梁船撞设计指南, 开展对桥墩防撞等级的分类。通过实际算例分析, 表明: 雅瑶大桥通航孔 9[#]和 10[#]桥墩均为低风险, 该船桥碰撞风险概率评估方法是合理的。

2) 该方法综合考虑了船舶撞击力的方向、撞击部位和撞击力的大小, 可为其他桥梁的设计和船舶的安全通航风险评估提供参考依据。

参考文献(References):

- [1] 袁星星. 基于 ABAQUS 显式分析下的船舶撞击桥梁上部结构研究[D]. 西安: 长安大学, 2019. (YUAN Xing-xing. Study on collision between ship and bridge superstructures for explicit dynamic of ABAQUS [D]. Xi'an: Chang'an University, 2019. (in Chinese))
- [2] 戴彤宇. 船撞桥及其风险分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2006. (DAI Tong-yu. Ship impact against bridge and its risk assessment[D]. Harbin: Harbin Engineering University, 2006. (in Chinese))
- [3] Aashto. Guide specification and commentary for vessel collision design of highway bridges[M]. Washington DC: American Association of State Highway and Transportation Officials, 2009.
- [4] 中交公路规划设计院有限公司. JTJ D60-2015, 公路桥涵设计通用规范[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2015. (CCCC Highway Consultants Co., Ltd. JTJ D60-2015, General specifications for design of highway bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2015. (in Chinese))
- [5] 刘海证, 李睿, 徐征. 泡沫铝外包混凝土桥墩防撞性能研究[J]. 公路工程, 2019, 44(4): 13-17, 40. (LIU Hai-zheng, LI Rui, XU Zheng. Research on anti-collision ability of bridge pier with aluminum foam outsourcing concrete[J]. Highway Engineering, 2019, 44(4): 13-17, 40. (in Chinese))
- [6] Woisin G. Design against collision[J]. International Symposium on Advances in Marine Technology: Trondheim, 1979(8): 91-92.
- [7] Pedersen P K, Valsgard S, Olsen D, et al. Ship impacts: Bow collisions[J]. International Journal of Impact Engineering, 1993, 13(2): 163-187.
- [8] 梁文娟, 金允龙, 陈高增. 船舶与桥墩碰撞力计算及桥墩防撞[C]//论文集编委会. 中国公路学会 2001 学术交流论文集. 北京: 中国公路学会, 2001: 346-352. (LIANG Wen-juan, JIN Yun-long, CHEN Gao-zeng. Calculation of collision force between ship and bridge pier and collision prevention of bridge pier[C]// Proceedings editorial board. China highway society'2001 A collection of essays for academic exchange. Beijing: China highway society, 2001: 346-352. (in Chinese))
- [9] 陈诚. 桥梁设计船撞力及损伤状态仿真研究[D]. 上海: 同济大学, 2006. (CHEN Cheng. Simulation study on ship impact force and damage state of bridge design[D].

- Shanghai:Tongji University,2006.(in Chinese))
- [10] 耿波.桥梁船撞安全评估[D].上海:同济大学,2007.
(GENG Bo. Bridge ship collision safety assessment[D].
Shanghai:Tongji university,2007.(in Chinese))
- [11] 何雄君,刘鑫,梁亚兰.大跨度小半径曲线梁桥抗倾覆性能研究[J].交通科学与工程,2019,35(2):89-93.(HE Xiong-jun, LIU Xin, LIANG Ya-lan. Research on the anti-overturning performance of long-span small-radius curved beam bridges[J]. Journal of Transport Science and Engineering,2019,35(2):89-93. (in Chinese))
- [12] 方海,钱长根,刘伟庆,等.株洲湘江一桥桥墩抗船撞能力评估及防撞方案研究[J].桥梁建设,2014,44(2):20-26.
(FANG Hai, QIAN Chang-gen, LIU Wei-qing, et al. Assessment of ship impact capacity and study of anti-impact scheme for pier of first Zhuzhou Xiangjiang river bridge[J]. Bridge Construction, 2014, 44(2): 20-26. (in Chinese))
- [13] 中交公路规划设计院有限公司.JTG 3362—2018,公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.(CCCC Highway Consultants Co., Ltd.. JTG 3362—2018, Specifications for design of highway reinforced concrete and prestressed concrete bridges and culverts[S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd.,2018.(in Chinese))