

船桥碰撞问题的理论解析

杨杰^{1,2} 艾军¹ 徐春林¹ 闫维明² 袁洁君¹

(1. 南京航空航天大学航空宇航学院, 南京, 210016;

2. 北京工业大学工程抗震与结构诊治北京市重点实验室, 北京, 100124)

摘要: 针对船桥碰撞问题, 进行了理论解析。首先建立了该问题的理论分析模型, 将船与桥作为一个整体系统进行分析, 通过在特定边界条件和初始条件下的振动系统方程求解, 得到了系统的频率方程、模态振型、动态响应以及撞击力的解析表达, 为桥梁防撞设计提供了参考。

关键词: 船桥撞击; 振动; 撞击力; 动力响应

中图分类号: U447

文献标志码: A

文章编号: 1005-2615(2013)06-0881-04

Theoretical Analysis on Ship-Bridge Collision

Yang Jie^{1,2}, Ai Jun¹, Xu Chunlin¹, Yan Weiming², Yuan Jiejun¹

(1. College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Key Lab of Earthquake Engineering and Structural Retrofit, Beijing University of Technology, Beijing, 100124, China)

Abstract: A theoretical method for solving the ship-bridge collision problem is presented. Firstly, the theoretical model is founded, where the ship and the bridge are considered as parts of a whole vibration system. Secondly, through solving the dynamic equation in particular boundary condition and initial condition, the frequency equation, mode shape, dynamic response and collision force can be gotten. It will be useful for the anti-collision design of bridge.

Key words: ship-bridge collision; vibration; collision force; dynamic response

进入新世纪以来, 随着经济建设的快速发展, 我国已建成并且还将继续建设大量跨河、跨江、跨海大桥。桥梁的大量建设缓解了我国日益加重的交通压力, 但同时桥梁遭遇船舶撞击的风险和概率也随之提高。表 1 中列出了近 30 年来国内外典型的船舶撞击桥梁事故^[1-4]。

据统计, 全球范围内由于船舶撞击桥梁造成的人员伤亡、财产损失以及环境破坏是巨大的^[1,2,5]。因而全面分析船桥撞击问题, 具有重要的现实意义。当前针对船桥撞击问题的研究, 主要集中于有限元仿真分析和碰撞试验^[6-10], 而针对该问题的理论分析鲜有报道。文中从力学分析入手, 对船桥撞击问题进行理论解析。

表 1 近 30 年来的船舶撞击桥梁事故

桥名	国家	发生年份	死亡人数
Almore Bridge	瑞典	1980	10
Sunshine Skyway Bridge	美国	1980	35
Lorraine Pipeline Bridge	法国	1982	7
Volga River Railroad Bridge	俄罗斯	1983	176
Volga River Railroad Bridge	俄罗斯	1984	240
Pontchartrain Lake	美国	1984	6
Judge William Seeber	美国	1993	1
Big Bayou Carrot Railroad Bridge	美国	1993	47
龙港大桥	中国	1998 2001	4
四川涪江桥	中国	1999	20
黎咀大桥	中国	2000	6

基金项目: 城市与工程安全减灾教育部重点实验室开放课题资助项目。

收稿日期: 2013-08-15; 修订日期: 2013-10-15

通信作者: 杨杰, 男, 副教授, 1976 年出生, E-mail: yangjie@nuaa.edu.cn。

续表

桥名	国家	发生年份	死亡人数
Isabel Bridge	美国	2001	8
Webber-Falls	美国	2002	12
Arkansas River Bridge	美国	2002	17
广东九江大桥	中国	2007	9
江苏昆山东门大洋桥	中国	2007	2
浙江宁波金塘大桥	中国	2008	4
上海大治河桥	中国	2010	2

1 理论分析模型

(1) 撞击船舶的简化。船舶与桥墩撞击过程中,船舶的船艏部分会发生变形。因而可以将船舶简化为一个具有一定质量和刚度的弹簧-质量系统。碰撞过程中弹簧的变形即可相当于船艏的变形。

(2) 桥墩的简化。在 AASHTO 规范、欧洲规范和中国规范中,船撞力计算均是基于刚性墙假定,而在船舶与桥墩撞击过程中,桥墩并不是完全刚性的,会产生一定变形。因而不能把桥墩简单的当作刚性墙来处理,而应将其视作具有一定质量、一定刚度的悬臂梁。

(3) 桥梁上部结构的简化。当桥墩受到水平向船舶撞击时,桥墩上受到的变形、位移瞬时通过支座传递到上部结构,上部结构也相应产生位移,同时上部结构又约束着桥墩的变形,上部结构与桥墩之间是相互作用、相互影响。所以在模型简化时必须考虑到上部结构对整个碰撞过程的影响,本文将上部结构简化为一个具有一定质量的实体,直接假设在桥墩的顶部。

(4) 桥墩的简化。实际撞击过程中,桥墩在埋置深度以下部分的桩土相互作用会对撞击响应产生影响。由于桩土作用机理较为复杂,涉及到地土的性质和具体参数,在本文研究中,将约束条件简化为固结,桩土作用的影响可以通过桥墩等效计算长度来近似处理。

基于以上分析,本文采用的船桥撞击分析的简化模型如图 1 所示。船舶(质量为 m_{par})在 $t=0$ 时刻以速度 $V=V_0$ 撞击到一端固结、另一端具有集中质量块的桥墩上。桥墩长度为 L ,墩的单位长度质量为 m ,撞击位置在 $x=\eta L$ 处,弹簧柔度系数为 f 。把桥墩与船舶作为一个振动系统。撞击点把桥墩分为上下两部分,其弯曲变形为 w_2, w_1 。

桥墩横向振动的微分方程为

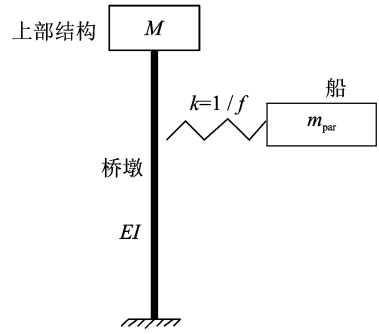


图 1 船桥撞击理论模型

$$EI \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \rho A \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: $w(x, t)$ 为横向位移; E 为弹性模量; I 为横截面惯性矩; A 为横截面面积; ρ 为密度。

相应的边界条件为

$$\begin{aligned} w_1(0, t) &= 0 \\ w_1'(0, t) &= 0 \\ w_2''(L, t) &= 0 \\ w_2'''(L, t) &= M \frac{\partial^2 w}{\partial t^2} \end{aligned} \quad (2)$$

弹簧连接处的连续性条件为

$$\begin{aligned} w_1(\eta L, t) &= w_2(\eta L, t) \\ w_1'(\eta L, t) &= w_2'(\eta L, t) \\ w_1''(\eta L, t) &= w_2''(\eta L, t) \end{aligned} \quad (3)$$

$$EI[w_1'''(\eta L, t) - w_2'''(\eta L, t)] = m_{\text{par}} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2}$$

对于弹簧,则为如下关系

$$m_{\text{par}} \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + \frac{1}{f}[u(t) - w(\eta L, t)] = 0 \quad (4)$$

2 振动系统解析

引入量纲一变量 $\xi = \frac{x}{L}$, $\theta = \frac{r}{L}$, $r = \sqrt{\frac{I}{A}}$, $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ 及时间变量 $\tau = tC_s/L$, $C_s = \sqrt{\frac{KG}{\rho}}$, 其中 K 为剪切形状系数。

设振型函数为:

$$\begin{aligned} W_1(\xi) &= C_1 \sin 2\beta\xi + C_2 \cos 2\beta\xi + C_3 \sinh 2\beta\xi + C_4 \cosh 2\beta\xi \\ W_2(\xi) &= C_5 \sin 2\beta\xi + C_6 \cos 2\beta\xi + C_7 \sinh 2\beta\xi + C_8 \cosh 2\beta\xi \end{aligned} \quad (5)$$

式中, $C_1 \sim C_8$ 为 8 个待定的积分常数。

得到相应的边界条件如下

$$W_1(0) = 0$$

$$\begin{aligned}
W_1'(0) &= 0 & 0 \leq \xi \leq \eta & \quad (9) \\
W_2''(1) &= 0 \\
EIW_2'''(1) &= -M\omega^2 W_2(1) \\
W_1(\eta) &= W_2(\eta) \\
W_1'(\eta) &= W_2'(\eta) \\
W_1''(\eta) &= W_2''(\eta) \\
EI[W_1'''(\eta) - W_2'''(\eta)] &= -m_{\text{par}}Z\omega^2 - \\
m_{\text{par}}Z\omega^2 + \frac{1}{f}[Z - W(\eta)] &= 0 & \quad (6)
\end{aligned}$$

从而可以得到关于 $C_1 \sim C_8$ 和 Z 的方程组

$$\begin{aligned}
C_2 + C_4 &= 0 \\
C_1 + C_3 &= 0 \\
C_5 \sin 2\beta + C_6 \cos 2\beta - C_7 \sinh 2\beta - C_8 \cosh 2\beta &= 0 \\
\rho AL^4 (-C_5 \cos 2\beta + C_6 \sin 2\beta + C_7 \sinh 2\beta + \\
C_8 \cosh 2\beta) + 2M\beta (-C_5 \sin 2\beta + C_6 \cos 2\beta + \\
C_7 \sinh 2\beta + C_8 \cosh 2\beta) &= 0 \\
(C_1 - C_5) \sin 2\beta\eta + (C_2 - C_6) \cos 2\beta\eta + \\
(C_3 - C_7) \sinh 2\beta\eta + (C_4 - C_8) \cosh 2\beta\eta &= 0 \\
(C_1 - C_5) \cos 2\beta\eta + (C_6 - C_2) \sin 2\beta\eta + \\
(C_3 - C_7) \cosh 2\beta\eta + (C_4 - C_8) \sinh 2\beta\eta &= 0 \\
(C_5 - C_1) \sin 2\beta\eta + (C_6 - C_2) \cos 2\beta\eta + \\
(C_3 - C_7) \sinh 2\beta\eta + (C_4 - C_8) \cosh 2\beta\eta &= 0 \\
(C_5 - C_1) \cos 2\beta\eta + (C_2 - C_6) \sin 2\beta\eta + \\
(C_3 - C_7) \cosh 2\beta\eta + (C_4 - C_8) \sinh 2\beta\eta + \\
2\beta m_{\text{par}}Z / \rho AL^4 &= 0 \\
C_1 \sin 2\beta\eta + C_2 \cos 2\beta\eta + C_3 \sinh 2\beta\eta + C_4 \cosh 2\beta\eta - \\
Z(1 - \frac{16fm_{\text{par}}EI\beta^4}{\rho AL^4}) &= 0 & \quad (7)
\end{aligned}$$

化简得系统对应的频率方程

$$\begin{aligned}
\left[\frac{\cosh(2\beta - 2\beta\eta) - \coth 2\beta + \frac{\cos(2\beta - 2\beta\eta)}{\sin 2\beta}}{\sinh 2\beta} - \right. \\
\left. \cot 2\beta \right] + [8 \sin 2\beta\eta \cos 2\beta \sinh(2\beta - 2\beta\eta) - \\
4 \cos 2\beta \cos 2\beta\eta (\sin 2\beta\eta \sinh 2\beta + \sinh 2\beta\eta \sin 2\beta) - \\
4 \cos 2\beta \cosh 2\beta\eta (\sinh 2\beta\eta \sinh 2\beta)] \frac{\alpha_{\text{par}}}{2\beta} + \\
(2 \sin 2\beta\eta \cosh 2\beta\eta - 2 \cos 2\beta\eta \sinh 2\beta\eta) + \\
(8 \sin 2\beta \cos 2\beta + 8 \sinh 2\beta \cos 2\beta) \alpha_{\lambda} (1 - fm_{\text{par}}\omega^2) + \\
4 (\sin 2\beta \sinh 2\beta + \cos 2\beta \cosh 2\beta + \cos 2\beta \sinh 2\beta - \\
\sin 2\beta \cosh 2\beta) = -4\alpha_M & \quad (8)
\end{aligned}$$

$$\text{式中: } \alpha_{\text{par}} = \frac{mL}{m_{\text{par}}}, \alpha_M = \frac{mL}{M}, \alpha_{\lambda} = \frac{M}{m_{\text{par}}}$$

求解得到桥墩的振型如下

$$\phi_{1i}(\xi) = \frac{\sin \beta_i (1 - \eta)}{\sin 2\beta_i} \sin 2\beta \xi - \frac{\sin \beta_i (1 - \eta)}{\sin 2\beta_i} \sinh 2\beta \xi$$

$$\begin{aligned}
\phi_{2i}(\xi) &= \frac{\sin \beta_i (1 - \eta)}{\sin 2\beta_i} \sin 2\beta \eta - \frac{\sin \beta_i (1 - \eta)}{\sin 2\beta_i} \sinh 2\beta \eta \\
\eta &\leq \xi \leq 1 & \quad (10)
\end{aligned}$$

桥墩的横向位移为

$$w_i(x, t) = \sum_{i=1}^{\infty} \phi_i(x) \left[A_i \cos(\omega_i t) + B_i \frac{\sin \omega_i t}{\omega_i} \right] \quad (11)$$

式中: A_i 和 B_i 为待定常数,由相应的初始边界条件决定。本问题的初始条件为

$$w(x, t) |_{t=0} = 0, \frac{\partial w(x, t)}{\partial t} |_{t=0} = \begin{cases} 0 & \xi \neq \eta \\ -V_0 & \xi = \eta \end{cases} \quad (12)$$

因此,可以得到桥墩的位移响应 $w(\xi, t)$ 和撞击质点的位移响应 $u(\xi, t)$ 分别为

$$\begin{aligned}
w(\xi, t) &= \frac{V_0 L}{c} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{m_{\text{par}} \psi_i(\xi) |_{\xi=\eta} \phi_i(\xi) \sin(\omega_i t)}{\lambda_i M_i} \\
u(\xi, t) &= \frac{V_0 L}{c} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{m_{\text{par}} \psi_i(\xi) |_{\xi=\eta} \psi_i(\xi) \sin(\omega_i t)}{\lambda_i M_i} & \quad (13)
\end{aligned}$$

式中,量纲一频率 $\lambda_i = \frac{\omega_i t}{\tau} = \frac{\omega_i L}{C_s}$ 。

为方便计,这里使用量纲一位移 $\tilde{w}(\xi, \tau)$,由于模态具有分段函数的形式,表达式如下

$$\begin{aligned}
\tilde{w}(\xi, t) &= \frac{c}{V_0 L} w(x, t) = \\
\begin{cases} \sum_{i=1}^{\infty} B_i \phi_{1i}(\xi) \sin(4\theta\beta_i^2 \sqrt{\frac{E}{KG}} \tau) & 0 \leq \zeta \leq \eta \\ \sum_{i=1}^{\infty} B_i \phi_{2i}(\xi) \sin(4\theta\beta_i^2 \sqrt{\frac{E}{KG}} \tau) & \eta < \zeta \leq 1 \end{cases} & \quad (14)
\end{aligned}$$

撞击质点的位移表达式如下

$$\tilde{u}(\tau) = \frac{c}{V_0 L} u(x) = \sum_{i=1}^{\infty} B_i \psi_i \sin(4\theta\beta_i^2 \sqrt{\frac{E}{KG}} \tau) \quad (15)$$

式中, $B_i = \frac{\psi_i(\xi)}{4\theta\beta_i^2 M_i}$ 。

相应的撞击荷载可表示为

$$\begin{aligned}
F(t) &= EA \frac{V_0}{c} \tilde{F}(\tau) \\
\tilde{F}(\tau) &= \sum_{i=1}^{\infty} \frac{16\alpha_M \theta}{M_i} \sin(4\theta\beta_i^2 \sqrt{\frac{E}{KG}} \tau) & \quad (16)
\end{aligned}$$

3 试验验证

本文针对一双柱式桥墩在撞击荷载下的动力响应进行了试验研究,试验结果与前述理论计算结果对比如表1和表2所示。

表1 不同撞击位置撞击力峰值的对比分析结果

撞击位置	理论值/kN	试验值/kN	差值/kN	相对误差/%
$\eta=1/4$	17.19	18.09	0.9	5.2
$\eta=5/8$	32.24	33.4	1.16	3.6

表2 不同撞击速度撞击力峰值的对比分析结果

撞击速度/ ($m \cdot s^{-1}$)	理论值/kN	试验值/kN	差值/kN	相对误差/%
1.6	24.47	22.4	-2.07	8
2.2	33.65	30.6	-3.05	9

4 结 论

本文建立了的船桥碰撞简化理论模型,将船桥视作一个振动系统,对系统振动方程进行了求解,得出了船舶撞击桥墩整个系统的频率方程、模态、撞击响应,最终给出了撞击力的计算公式。得出主要结论如下:

(1)通过将船桥视作一个耦合振动系统,可将复杂的撞击问题转化为经典振动问题,通过直接模态叠加法,可以求解在特定边界条件和初始条件下的振动系统方程,得到各阶模态振型及撞击响应与撞击力。

(2)由系统频率方程可知,系统频率与撞击点位置、墩高、船舶的刚度、上部结构与墩的质量比以及船舶与墩的质量比有关。

(3)由撞击力公式表明,撞击力的大小不仅与船舶撞击的初始速度成正比,并与系统频率相关。

(4)本文得到的船桥撞击理论解,可用于结构防撞设计时的荷载估算,并可为相应规范中的船撞荷载取值提供依据。

参考文献:

[1] 杨渡军. 船舶撞墩毁桥事件的现状研究[J]. 重庆交通学院学报, 1985, 15(4): 41-48.
Yang Dujun. A review of ship-bridge collision[J]. Journal of Chongqing Jiaotong University, 1985, 15

(4): 41-48.

- [2] 戴彤宇, 聂武. 船撞桥事故综述[J]. 黑龙江交通科技, 2003(2): 1-3.
Dai Tongyu, Nie Wu. Overview of the vessel bump bridge accident [J]. Communications Science and Technology Heilongjiang, 2003(2): 1-3.
- [3] 杨渡军. 桥梁的防撞保护系统及其设计[M]. 北京: 人民交通出版社, 1990.
Yang Dujun. Anti-collision system of bridge and its design [M]. Beijing: People's Communication Press, 1990.
- [4] Bin Yan, Gonglian Dai. Investigation and countermeasures of ship-bridge collision accidents in China in recent years[J]. Advanced Materials Research, 2011 (168/169/170): 167-174.
- [5] 朱瑾瑜. 船撞桥事故间接经济损失分析评价[D]. 上海: 同济大学, 2009.
Zhu Jinyu. Indirect economic loss evaluation of ship-bridge collision [D]. Shanghai: Tongji University, 2009.
- [6] Woisin G. Design against collision [J]. Schiff and Hafen, 1979, 31(2): 1059-1069.
- [7] Liu Jiancheng, Gu Yongning, Hu Zhiqiang. Simulation of ship-bridge collision based on FE model of whole ship-bridge [J]. Journal of Ship Mechanic, 2003, 7(3): 107-116.
- [8] Lin Jianfan, Su Yan, Du Yueting. Vessel-bridge collision force research on ordinary highway bridge in Fujian navigable river [J]. Advanced Materials Research, 2012(594/595/596/597): 1543-1546.
- [9] Tian Li, Zhu Cong. Numerical simulation of ship-bridge collision based on LS-DYNA technique [J]. Advanced Materials Research, 2011 (243/244/245/246/247/248/249): 6230-6236.
- [10] Zhou Li, Han Leyuan, Li Yang. Finite element simulation on collision of ship with cross-sea bridge and protection of marine structures [J]. Computer Aided Engineering, 2009, 18(4): 41-43.