

文章编号: 1001-7372(2011)02-0049-07

超高车辆 - 桥梁上部结构撞击力的 工程计算方法

陆新征, 卢 啸, 张炎圣, 何水涛

(清华大学 土木工程安全与耐久教育部重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为了弥补中国在超高车辆撞击桥梁上部结构领域研究的不足, 完善其工程设计方法, 在超高车辆撞击桥梁上部结构的事故案例调查和精细化有限元分析的基础上, 提出了超高车辆桥梁上部结构撞击的简化计算模型, 建立了简化模型的微分方程组, 利用数值试验的方法确定了简化模型中的部分参数, 从而得出简化计算模型的撞击荷载; 为了满足工程设计的需要, 在简化模型的基础上提出了形式简单的撞击力设计公式, 以表格的形式给出了设计公式中基本参数的主要取值, 并将简化模型和设计公式的计算结果与有限元结果进行了比较。结果表明: 根据简化模型和设计公式计算得到的撞击荷载与精细有限元模型的计算结果吻合较好, 且偏于安全, 可为工程设计提供参考。

关键词: 桥梁工程; 桥梁上部结构; 简化模型; 撞击力; 超高车辆; 设计公式

中图分类号: U 447 文献标志码: A

Engineering Calculation Method for Collision Force Between Over-height Truck and Bridge Superstructure

LU Xinzheng, LU Xiao, ZHANG Yansheng, HE Shuitao

(Key Laboratory of Civil Engineering Safety and Durability of Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: In order to make up the insufficient research on the collisions between over high truck and bridge superstructure in China and to improve the corresponding engineering design method, based on the accident investigation and high precision finite element analysis on the collision between over-high truck and bridge superstructure, a simplified computational model was proposed to calculate the collision between over-high truck and bridge superstructure. The differential equations of the simplified model were established and parts of factors in the model were determined by numerical experiments. Therefore, the collision load can be computed by the simplified model. Furthermore, in order to satisfy the engineering application, design formula of collision force with simple form based on the simplified model was proposed, and the basic factor values in the design formula were given in a table. Results show that the design formula results and the simplified model results are in good agreement with finite element results, and they are relatively safe. So they can provide reference for engineering design.

收稿日期: 2010-06-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(50808106); 国家西部交通建设科技项目(2008 318 223 43);

教育部长江学者和创新团队发展计划项目(IRT00736)

作者简介: 陆新征(1978), 男, 安徽芜湖人, 副教授, 工学博士, E-mail: luxz@tsinghua.edu.cn.

Key words: bridge engineering; bridge superstructure; simplified model; collision force; over-height truck; design formula

0 引言

随着城市化进程的日益加快,立体交通已成为解决城市交通压力的重要途径。但是,伴随而来的超高车辆撞击桥梁上部结构的事故也与日俱增。根据北京市交通部门的统计数据^[1],北京市约有50%的桥梁上部结构曾遭受过超高车辆的撞击,由此损坏的桥梁占有所有损坏桥梁的20%以上。即使在西方发达国家,此类事故也是屡次发生。据美国抽样数据显示^[2-4],美国大约61%的跨线桥梁上部结构曾遭受过超高车辆的撞击,超高车辆撞击造成的桥梁破坏约占所有破坏桥梁总数的14%。可见超高车辆撞击是导致桥梁损坏的一个重要原因,而中国目前对该问题尚缺乏系统研究。因此开展超高车辆撞击桥梁上部结构的损坏机理分析与防护研究具有重要的工程意义。

中国以前的桥梁规范中,对超高车辆撞击荷载并未加以规定。在中国的《桥梁通用规范》(JTGD60—2004)中,参考国外规范,对车辆撞击荷载的简单规定如下:“汽车撞击力标准值在车辆行驶方向取1 000 kN,在车辆行驶垂直方向取500 kN,2个方向的撞击力不同时考虑,撞击力作用于行车道1.2 m处,直接分布于撞击涉及的构件上”。显然,中国规范对车辆撞击力的建议过于笼统,且仅适用于车辆撞击桥面设施的情况,这无法满足中国多种多样的路面交通条件和桥梁状况。本文中在有关车桥撞击有限元模拟和机理分析的基础上,通过简化边界条件,构建了超高车辆-桥梁上部结构撞击的简化计算模型,并根据简化计算模型,提出了可供工程设计参考的简便且具有足够精度的工程设计方法,研究结果可供超高车辆撞击桥梁上部结构的设计参考。

1 已有研究成果

笔者在文献[5]~[9]中,提出了超高车辆撞击桥梁上部结构的精细化有限元模型(典型撞击过程模拟见图1),并通过多种车型、多种桥型、多种撞击工况的模拟,检验了精细化有限元模型的准确性和合理性,讨论了遭受上部车辆撞击后桥梁的破坏模式,得到以下主要结论:

(1)根据事故调查和有限元分析,超高车辆撞击

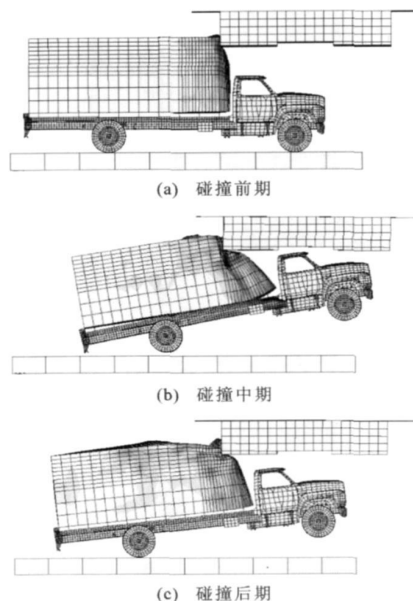


图1 碰撞过程车辆位移和变形

Fig. 1 Truck Displacement and Deformation During Collision Process

导致桥梁上部结构的破坏模式主要分为2类:局部型破坏和整体型破坏。局部型破坏是由瞬时冲击力造成的碰撞区域破坏,它主要受到最大撞击力的影响,包括碰撞区域混凝土开裂、崩落、钢筋屈服等。整体型破坏是由于撞击过程中动量转换,引起桥梁上部结构位移响应而导致的破坏。它主要受到撞击冲量的影响。造成整体破坏的有害位移响应主要包括:①导致落梁破坏的水平刚体平移;②导致弯曲破坏的水平弯曲变形和竖直弯曲变形;③导致扭转破坏的扭转变形。当碰撞过程中桥梁上部结构的位移响应超过容许限值后,就会造成整体型损伤,而且上部结构的位移响应越大,造成的损伤程度也越大,比如当水平刚体位移足够大后,就会造成桥梁支座损坏,甚至桥梁上部结构的落梁破坏。

(2)通过不同车型、不同桥型、不同速度等撞击工况的对比可知,桥梁参数对撞击荷载时程影响很小,而车辆参数对撞击荷载影响很大。对于同一种车型,撞击冲量随车速增加而几乎呈线性增加,最大撞击荷载也随车速增大而提高。对于不同车型,撞击荷载受撞击局部车厢构造影响很大,一般说来,罐车的撞击力最大,集装箱车的撞击力最小。

(3)由于撞击作用时间一般远小于桥梁上部结

构自振周期,故车桥撞击过程可以近似分为2个过程:①车辆-桥梁撞击过程;②桥梁上部结构位移响应过程。因此,可以首先计算得到车辆-桥梁的撞击力时程,再将该力时程施加到桥梁结构上,得到桥梁的响应。文献[9]的研究表明,用该方法得到的桥梁上部结构位移响应和直接利用有限元方法得到的上部结构位移响应时程吻合良好。因此,如何简化撞击模型并得到车桥撞击的荷载时程,就成为超高车辆撞击桥梁上部结构研究的关键问题。

2 简化计算模型

基于精细有限元模型的有关分析,可以提出超高车辆-桥梁上部结构撞击的简化计算模型。

2.1 基本假定

如前所述,因为桥梁上部结构的刚度和自重一般远大于撞击车辆,故不同桥型撞击荷载的计算结果差别不大。撞击荷载时程主要受车辆参数影响。基于以上分析,提出了以下4个假定:①忽略车厢-桥梁的摩擦力;②忽略车轮-路面摩擦力;③忽略车辆重力;④桥梁简化成刚性墙体。以 $60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 速度标准双轴卡车撞击组合梁为例,简化条件对计算结果影响如图2所示,更详细的讨论结果见文献[8]。从图2可以明显看出,上述简化条件对撞击荷载的影响很小,这样的简化是合理的。

2.2 模型的建立

基于上述简化假定,建立超高车辆撞击桥梁上部结构的简化计算模型,如图3所示。精细化有限元计算结果表明,超高车辆的位移响应包括水平和竖直方向的刚体平动以及绕后车轴的刚体转动,所以将超高车辆的质量集中到后车轴,并赋予转动惯量和刚臂[图3(a)]。运动坐标系包括3个自由度 (x, y, θ) ,原点 O 选在后车轴的初始位置[图3(b)]。图3中, H 为碰撞区域到后车轴的竖直距离, L 为碰撞区域到后车轴的水平距离, J 为车辆绕后车轴的转动惯量, m_0 为车辆质量, V_0 为车辆的初始速度, θ 为绕后轴转动角度, x 、 y 分别为水平和竖直位移, F_x 、 F_y 分别为水平和竖直撞击力, k_x 、 k_y 分别为水平和竖直弹簧的压缩刚度(拉伸时为0), F_{px} 、 F_{py} 为水平弹簧和竖直弹簧的屈服力。路面对超高车辆的支持力 F_w 用竖直弹簧模拟,其刚度 k_w 为车轮的压缩刚度(拉伸时值为0)。

事故调查和有限元分析表明,在碰撞过程中车厢会产生很大的塑性变形,这是由于水平撞击力 F_x 和竖直撞击力 F_y 引起的,在简化模型中分别用理

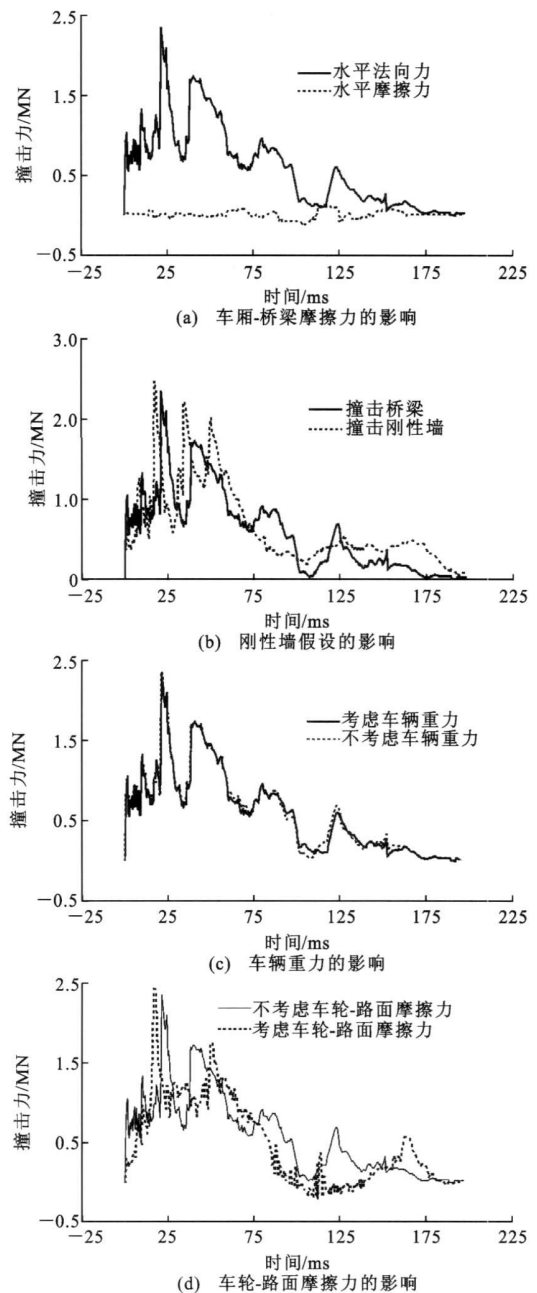


图2 简化假定对撞击力时程的影响

Fig. 2 Influences of Simplified Assumptions on Time-histories of Collision Forces

想的弹塑性弹簧来简化模拟。

根据刚体运动规律,建立以下运动微分方程

$$\left. \begin{aligned} m_0 \ddot{x} &= -F_x(k_x, F_{px}, x - H \sin \theta, dp_x) \\ m_0 \ddot{y} &= -F_y(k_y, F_{py}, y + L \sin \theta, dp_y) + F_w(k_w, y) \\ J \ddot{\theta} &= F_x(k_x, F_{px}, x - H \sin \theta, dp_x) H \cos \theta - F_y(k_y, F_{py}, y + L \sin \theta, dp_y) L \cos \theta \\ x(0) &= 0, y(0) = 0, \theta(0) = 0, \dot{x}(0) = V_0, \\ \dot{y}(0), \theta(0) &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

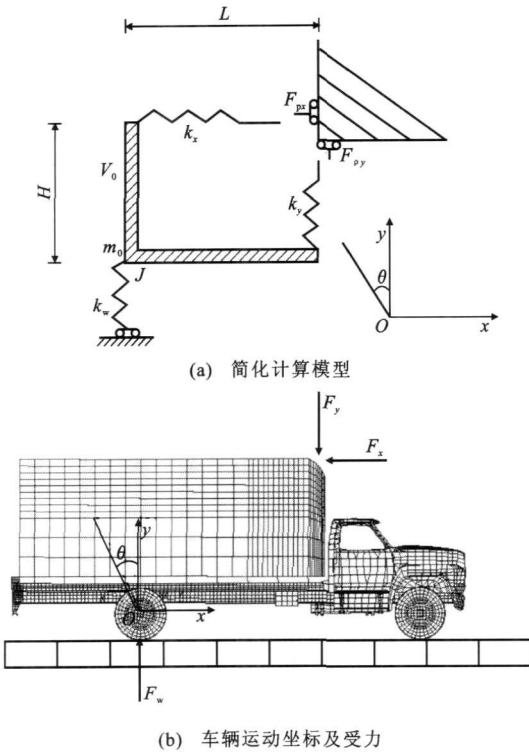


图3 简化计算模型和运动坐标系

Fig.3 Simplified Calculation Model and Kinetic Coordinate System

式中: dp_x 、 dp_y 分别为水平和竖直弹簧的累积塑性变形量。

式(1)中参数主要分为2类,一类可以根据车型及载货情况简单确定,如质量 m_0 、转动惯量 J 、车轮压缩刚度 k_w 、刚臂长度 H 和 L 、初始速度 V_0 ;另一类参数与碰撞过程有关,比较难确定,包括碰撞过程接触区域的压缩刚度 k_x 、 k_y 和屈服力 F_{px} 、 F_{py} 。文献[8]中运用压缩数值试验的方法确定了参数 k_x 、 k_y 、 F_{px} 、 F_{py} 的取值。标准双轴卡车水平和竖直弹簧力-变形关系曲线如图4所示,标准双轴卡车、厢式车、自卸车、罐车的基本参数如表1所示,最终确定的各种不同车型简化模型参数 k_x 、 k_y 、 F_{px} 、 F_{py} 的取值如表2所示。

表1 各种车辆基本参数取值

Tab.1 Basic Parameter Values of Vehicles

车型	m_0/t	$J/$ ($kN \cdot m \cdot s^2$)	$k_w/$ ($kN \cdot mm^{-1}$)	H/m	L/m
标准双轴卡车	7.17	76.4	3.00	3.25	3.50
厢式车	10.00	135.0	5.00	3.75	4.00
自卸车	10.00	137.0	5.00	3.75	4.00
罐车	10.00	139.0	5.00	3.75	4.00

2.3 计算结果验证

将上述参数代入简化模型(式1),选取同样车

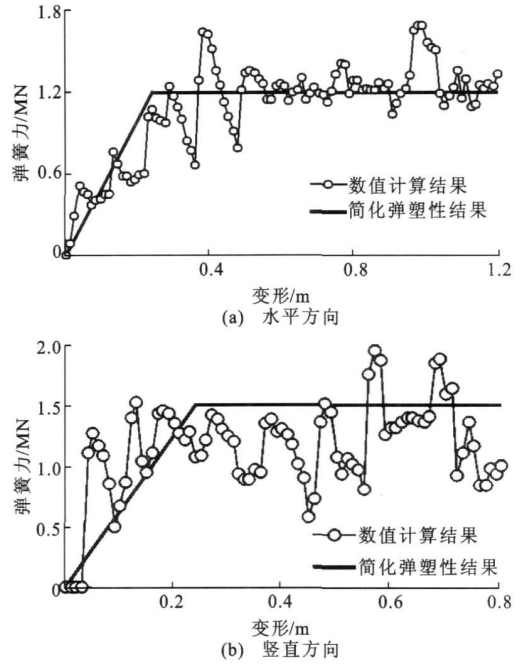


图4 标准双轴卡车水平和竖直弹簧力-变形曲线

Fig.4 Relations of Spring Force and Deformations for Horizontal and Vertical Direction of Standard Double Axle Truck

表2 简化模型的参数取值

Tab.2 Parameter Values in Simplified Model

车型	$k_x/$ ($kN \cdot mm^{-1}$)	$k_y/$ ($kN \cdot mm^{-1}$)	F_{px}/kN	F_{py}/kN
标准双轴卡车	5.00	6.25	1 200	1 500
厢式车	2.00	4.00	800	700
自卸车	4.00	6.00	3 000	3 000
罐车	4.00	5.00	2 500	2 500

速、车重情况下撞击荷载最大的罐车和自卸车为例,将计算得到的撞击冲量和0.1 s平均撞击力^[10]与有限元模型计算结果进行对比,如图5、6所示。图5中, I 为简化模型或设计公式计算撞击冲量, I' 为有限元计算撞击冲量。图6中, F_m 为简化模型或设计公式计算的0.1 s平均撞击力, F'_m 为有限元计算的0.1 s平均撞击力。图5、6中以有限元计算结果作为横坐标,以简化模型或设计公式计算结果作为纵坐标,则对角线代表了有限元的理论结果,显然,简化模型的计算结果分布在该对角线附近,且略高于有限元计算结果,表明简化模型结果与有限元计算结果吻合良好,且偏于安全,符合工程精度的要求。以速度 $V_0 = 60 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ 的罐车撞击组合梁桥为例,撞击力时程曲线如图7所示,可见由简化模型计算得到的撞击力时程的大致趋势与有限元计算结果一致,且最大撞击力基本吻合,可用于工程设计。

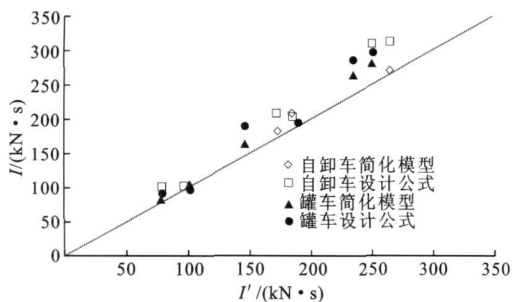


图 5 撞击冲量计算结果比较

Fig. 5 Comparisons of Calculated Results of Impact Impulses

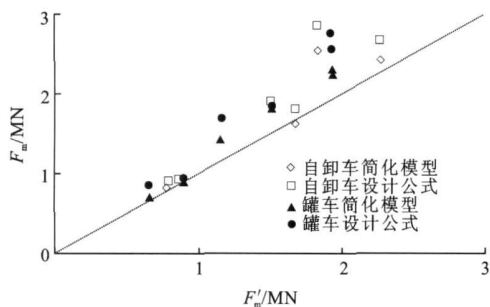


图 6 撞击力计算结果比较

Fig. 6 Comparisons of Calculated Results of Impact Forces

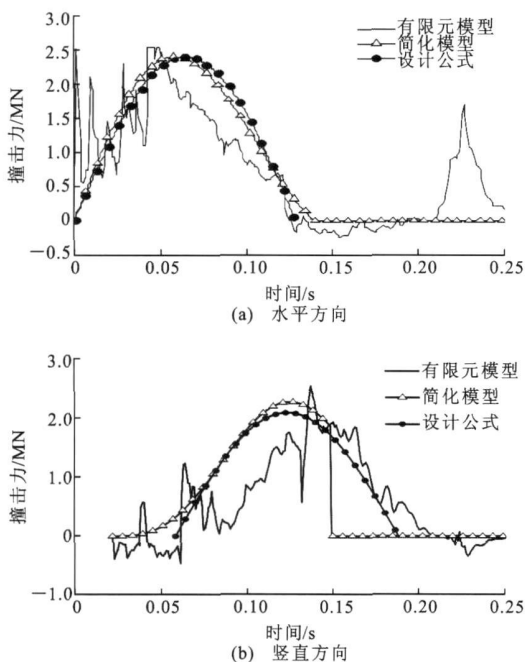


图 7 罐车撞击组合梁桥撞击力时程比较

Fig. 7 Comparisons of Time-histories of Collision Forces Between Composite Beam Bridge and Tank Truck

3 撞击荷载设计公式

虽然简化计算模型大大简化了撞击荷载的计算

过程, 但是仍然需要求解刚体运动的微分方程, 在实际工程设计中很难大量推广, 因此本文中进一步提出了撞击荷载的工程设计公式。

3.1 设计公式及参数取值

虽然对超高车辆撞击桥梁上部结构的荷载设计公式各国研究都比较缺乏, 但是在船舶撞击桥墩等领域, 各国对撞击力设计公式的研究都比较充分。船舶撞击桥墩的设计公式主要分为 3 类:

(1) 基于能量原理的撞击力设计公式, 包括欧洲规范^[11]公式[式(2)]和中国《铁路桥涵设计基本规范》^[12]公式[式(3)]

$$F_d = V_1 \sqrt{km_1} \quad (2)$$

$$F_d = \gamma V_1 \sin \phi \sqrt{\frac{m_1}{c_1 + c_2}} \quad (3)$$

式中: F_d 为设计撞击力; V_1 为船舶速度; m_1 为船舶质量; k 为变形刚度; γ 为能量损失系数; ϕ 为碰撞角度; c_1 、 c_2 分别为船舶变形系数和桥墩变形系数。

对比可见, 式(3)中进一步考虑了碰撞过程中的能量损失系数 γ 和碰撞角度 ϕ 。另外, 式(3)中将式(2)的 k 细化为船舶变形系数 c_1 和桥墩变形系数 c_2 两个部分。

(2) 基于动量原理的撞击力设计公式。中国《公路桥涵设计通用规范》^[13]中撞击力计算公式就是根据动量原理建立的, 即

$$F_{mn} = \frac{m_1 V_1}{gt}, \quad F_d = F_{max} = 2F_{mn} \quad (4)$$

式中: g 为重力加速度; F_{mn} 为平均撞击力; F_{max} 为最大撞击力; t 为撞击持时。

可见, 式(4)中根据动量定理推导出平均碰撞力, 然后认为最大撞击力是平均撞击力的 2 倍, 并以此作为工程设计的平均撞击力。

(3) 基于试验数据和经验总结的撞击力设计公式, 主要有美国规范 AASHTO^[14]中提出的公式

$$F_d = 0.98 \sqrt{m_1} \frac{V_1}{8} \quad (5)$$

式(5)的理论基础也是能量原理, 但不包含变形刚度, 而是基于试验和事故拟合得到的统一系数。

本文中借鉴上述船舶撞击桥墩的设计公式, 建立超高车辆撞击桥梁上部结构的荷载设计公式。基于简化计算模型的碰撞力时程(图 7), 本文中建议将超高车辆在水平和竖直方向的撞击荷载时程都简化为半正弦曲线模型, 其撞击力时程见图 8, 撞击力 $P_i(t)$ 和撞击总冲量 I_i 的计算公式见式(6)

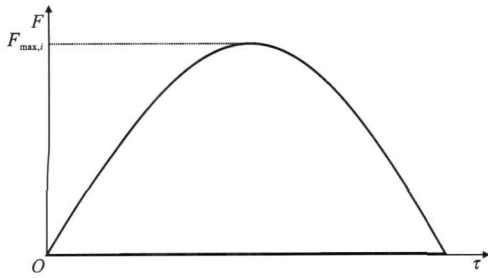


图8 设计冲击力历程

Fig.8 Time history of Design Collision Force

$$P_i(\tau) = F_{max,i} \sin\left(\frac{\pi\tau}{t_i}\right) \quad i = x, y$$

$$I_i = \int_0^{t_i} P_i(\tau) d\tau \quad (6)$$

式中: τ 为撞击过程的任意时刻; $F_{max,i}$ 为撞击过程中的最大撞击力, $i = x, y$ 分别代表水平和竖直方向; t_i 为撞击作用时间。

该模型包含 3 个基本参数: 撞击总冲量 I_i 、最大撞击力 $F_{max,i}$ 和撞击作用时间 t_i 。这 3 个参数中, 只要知道了其中 2 个, 第 3 个就确定了。由于桥梁的整体型破坏主要由撞击总冲量 I_i 控制, 桥梁的局部型破坏由最大撞击力 $F_{max,i}$ 控制, 故本文中以此 2 个参数作为设计公式的基本参数。参考已有的船舶撞击荷载设计公式, 建议水平和竖直方向的撞击冲量 I_x, I_y 和最大撞击力 $F_{max,x}, F_{max,y}$ 的设计计算公式如式(7)、(8)所示

$$\left. \begin{aligned} I_x &= \alpha_x m_0 V_0 \\ I_y &= \alpha_y m_0 V_0 \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} \beta_i^2 m_0 V_0^2 = \frac{1}{2} \frac{F_{max,i}^2}{k_i} \Rightarrow \begin{cases} F_{max,x} = \beta_x \sqrt{m_0 k_x} V_0 \\ F_{max,y} = \beta_y \sqrt{m_0 k_y} V_0 \end{cases} \quad (8)$$

式中: $\alpha_x, \alpha_y, \beta_x, \beta_y$ 为量纲一的参数。

式(7)的理论基础是动量定理, 式(8)的理论基础是能量守恒原理。本文中通过大量的有限元分析表明, α_x, α_y 的取值主要取决于以下 3 个量纲一的参数: ①转动难易程度 $J/[m_0(L^2 + H^2)]$, ②竖直和水平弹簧刚度比 k_y/k_x , ③水平和竖直刚臂长度比 L/H 。通过对处于工程实际范围内的 $J/[m_0(L^2 + H^2)], k_y/k_x, L/H$ 进行大量参数分析, 可以得到 β_x, β_y 的取值, 典型的参数取值如表 3 所示。对于任意给定车辆, 只要知道了车辆参数, 通过对表 3 的线性插值可以得到 β_x, β_y 的取值, 进而可以由式(7)、(8)计算得到撞击冲量和最大撞击力。

3.2 设计公式的验证

为了验证设计公式的准确性, 将设计公式计算的撞击冲量和撞击力与简化模型及有限元模型计算

表 3 设计公式参数取值

Tab.3 Parameter Values of Design Formula

$\frac{J}{m_0(L^2 + H^2)}$	$\frac{L}{H}$	$\frac{k_y}{k_x}$	α_x	α_y	β_x	β_y
0.35	1.0	0.75	0.95	0.88	0.65	0.68
		1.00	1.01	1.23	0.66	0.64
		1.50	1.13	1.35	0.67	0.57
		2.00	1.19	1.30	0.68	0.51
	1.5	0.75	1.31	1.19	0.75	0.66
		1.00	1.39	1.26	0.76	0.60
		1.50	1.48	1.19	0.77	0.50
		2.00	1.50	1.11	0.79	0.43
	2.0	0.75	1.54	1.08	0.82	0.58
		1.00	1.60	1.09	0.83	0.52
		1.50	1.66	1.00	0.84	0.42
		2.00	1.67	0.92	0.86	0.36
0.50	1.0	0.75	1.10	0.74	0.72	0.62
		1.00	1.13	0.96	0.72	0.59
		1.50	1.20	1.22	0.73	0.52
		2.00	1.25	1.26	0.73	0.47
	1.5	0.75	1.39	0.93	0.80	0.60
		1.00	1.44	1.09	0.81	0.55
		1.50	1.51	1.16	0.81	0.46
		2.00	1.55	1.09	0.82	0.40
	2.0	0.75	1.59	0.90	0.86	0.53
		1.00	1.63	1.00	0.86	0.47
		1.50	1.69	0.99	0.87	0.39
		2.00	1.71	0.92	0.88	0.33
0.65	1.0	0.75	1.21	0.68	0.76	0.57
		1.00	1.23	0.85	0.76	0.54
		1.50	1.28	1.07	0.77	0.48
		2.00	1.32	1.16	0.77	0.43
	1.5	0.75	1.47	0.80	0.83	0.54
		1.00	1.50	0.95	0.84	0.50
		1.50	1.55	1.07	0.84	0.43
		2.00	1.59	1.05	0.85	0.37
	2.0	0.75	1.64	0.77	0.88	0.48
		1.00	1.67	0.88	0.89	0.43
		1.50	1.71	0.93	0.89	0.36
		2.00	1.73	0.89	0.90	0.31

的结果进行了比较, 比较结果如图 5~ 7 所示。从图 5、6可以看出, 计算结果分布在对角线附近, 且主要分布在对角线左上方, 表明设计公式的计算结果与有限元模型计算结果吻合较好, 且偏于安全, 满足工程设计需求; 撞击冲量 I 计算精度较高, 0.1 s 平均撞击力 F_m 由于受到车厢局部塑性等复杂因素影响, 计算精度稍低, 但满足工程应用的精度要求。

4 结 语

(1) 提出了超高车辆-桥梁上部结构碰撞的简化计算模型,标定了简化模型的参数,简化模型得到的撞击力时程与精细化有限元计算结果吻合良好。

(2) 基于简化模型,提出了适合于工程设计的超高车辆撞击桥梁上部结构的撞击荷载设计公式,并给出了公式系数的取值表;撞击荷载的计算结果与精细化有限元计算结果吻合良好,且偏于安全,为实际工程设计提供了参考。

参考文献:

References:

- [1] 王军华,叶晓彦. 立交桥试用激光防撞预警系统[N]. 北京晚报,2007-07-31(12).
WANG Jun hua, YE Xiao yan. Application of Laser Collision Avoidance System for Viaduct[N]. Beijing Evening, 2007-07-31(12).
- [2] MONIQUE C H. Evaluation of the Performance of Bridge Steel Pedestals Under Low Seismic[D]. Atlanta: Georgia Institute of Technology, 2007.
- [3] Manual Notice: 200 F 1, Bridge Design Manual[S].
- [4] FU C C, BURHOUSE J R, CHANG G L. Overheight Vehicle Collisions with Highway Bridges[J]. Transportation Research Record, 2004(1865): 80-88.
- [5] 张炎圣, 陆新征, 宁 静, 等. 超高车辆撞击组合结构桥梁的仿真分析[J]. 交通与计算机, 2007, 25(3): 65-69.
ZHANG Yan sheng, LU Xir zheng, NING Jing, et al. Computer Simulation for the Impact Between Over high Truck and Composite Viaduct[J]. Computer and Communications, 2007, 25(3): 65-69.
- [6] 陆新征, 张炎圣, 宁 静, 等. 超高车辆与立交桥碰撞的高精度非线性有限元仿真[J]. 石家庄铁道学院学报, 2007, 20(1): 29-34.
LU Xir zheng, ZHANG Yan sheng, NING Jing, et al. Simulation of Impact Between Over-high Truck and Viaduct Based on High Precision Nonlinear Finite Element Analysis[J]. Journal of Shijiazhuang Railway Institute, 2007, 20(1): 29-34.
- [7] LU X Z, ZHANG Y S, NING J, et al. Nonlinear Finite Element Simulation for the Impact Between Over high Truck and Bridge Superstructure[C]// HUANG F L, LI Q M, LOK T S. Proceedings of the 7th International Conference on Shock & Impact Loads on Structures. Singapore: CF Premier Pte Ltd, 2007: 387-394.
- [8] 张炎圣. 超高车辆-桥梁上部结构碰撞: 机理分析与荷载计算[D]. 北京: 清华大学, 2009.
ZHANG Yan sheng. Collision Between Over high Trucks and Bridge Superstructures: Mechanism and Loads[D]. Beijing: Tsinghua University, 2009.
- [9] 陆新征, 张炎圣, 叶列平, 等. 超高车辆-桥梁上部结构碰撞的破坏模式与荷载计算[J]. 中国公路学报, 2009, 22(5): 60-67.
LU Xir zheng, ZHANG Yan sheng, YE Lie ping, et al. Failure Modes and Load Calculation of Collision Between Over high Truck and Bridge Superstructure [J]. China Journal of Highway and Transport, 2009, 22(5): 60-67.
- [10] ROBERT E A, FANOUS F S, ANDRAWES B O. Steel Diaphragms in Prestressed Concrete Girder Bridges[R]. Ames: Iowa Department of Transportation, 2004.
- [11] EN 1991-1-1, Eurocode 1: Actions on Structures[S].
- [12] TB 1002.1—2005, 铁路桥涵设计基本规范[S].
TB 1002.1—2005, Fundamental Code for Design on Railway Bridge and Culvert[S].
- [13] JTG D60—2004, 公路桥涵设计通用规范[S].
JTG D60—2004, General Code for Design of Highway Bridges and Culverts[S].
- [14] AASHTO GVCB 2-II, Guide Specification and Commentary for Vessel Collision Design of Highway Bridges[S].