

文章编号:1671-8879(2011)06-0054-06

车桥撞击动力学分析模型

樊文才^{1,3}, 张 南², 阎卫国^{1,3}

(1. 江苏省交通科学研究院, 江苏 南京 211112; 2. 南京工业大学 土木工程学院, 江苏 南京 210009;
3. 长大桥梁健康检测与诊断技术交通行业重点实验室, 江苏 南京 211112)

摘 要:针对频发的车桥撞击事故,采用落锤冲击试验装置,进行了钢筋混凝土圆形桥墩模型在静力及侧向撞击荷载下的力学性能试验,建立了车桥撞击动力学分析模型。试验结果表明:桥墩撞击荷载下破坏模式与撞击力及材料动态性能相关;基于达朗贝尔原理建立的车桥一维碰撞的单自由度、双自由度模型求解撞击力与试验值基本吻合,峰值及平均值误差分别为-15.4%和14.5%。

关键词:桥梁工程;车桥碰撞;钢筋混凝土桥墩;缓冲器;应变率

中图分类号:U443.26

文献标志码:A

Calculation on impact force of vehicle collision on bridge

FAN Wen-cai^{1,3}, ZHANG Nan², YAN Wei-guo^{1,3}

(1. Jiangsu Province Institute of Transportation Research, Nanjing 211112, Jiangsu, China; 2. School of Civil Engineering, Nanjing University of Technology, Nanjing 210009, Jiangsu, China; 3. Key Laboratory for Large-span Bridge Health Inspection & Diagnosis Technology of Ministry of Transportation, Nanjing 211112, Jiangsu, China)

Abstract: In order to study the collision of vehicle on bridge, the static and dynamic tests of reinforced concrete pier model under lateral impact loading were conducted by falling-weight impact equipment, and the dynamic analysis models were set up. The tests show that the failure mode of pier is related to the impact force and the dynamic mechanical properties of materials. The results show that the impact force calculated by dynamic equations about single-degree-of-freedom and two-degree-of-freedom models under one-dimensional conditions based on the D'Alembert principle are coincided to tests probably, the errors of peak and average are -15.4% and 14.5%. 5 tabs, 7 figs, 12 refs.

Key words: bridge engineering; vehicle collision on bridge; reinforced concrete pier; buffer; strain rate

0 引 言

近年来,中国交通运输事业迅猛发展,船舶、车辆对桥梁结构撞击事件屡有发生。车桥撞击力计算、桥梁的动态力学性能、耐撞设计及防撞设施应用等问题已引起工程技术人员及学者的广泛关注。

由于足尺试验条件的限制,研究这一课题主要采用混凝土构件模型的落锤冲击试验及软件仿真分析,目前对研究结构动力性能及设计参数极为有效。大量混凝土结构冲击试验表明,车桥撞击是个非常复杂的非线性动态响应过程,短时间内将发生剧烈的能量交换,并会伴随结构的局部损伤或破坏^[1-6]。

收稿日期:2010-11-18

作者简介:樊文才(1985-),男,山东菏泽人,助理工程师,工学硕士,E-mail:fanwencai2007@126.com。

车桥撞击的力学研究涉及到多种因素:桥墩构造、撞击能量和桥墩防护等。为此,本文基于达朗贝尔原理,计算车桥撞击力。

1 试验方法

在前期桥墩撞击试验的基础上,本文进行了钢筋混凝土圆形桥墩静力及撞击对比试验研究。桥墩模型由承台、墩身和盖梁 3 部分组成,鉴于试验条件的限制,不考虑桥墩实际的桩-土效应;采用承受轴压力的一端固定、一端简支的约束状态;静力试验由千斤顶按步长 0.5 t 加载;撞击试验由落锤(质量 m 为 542 kg)模拟车辆荷载侧向撞击桥墩,并施加轴压力模拟桥梁上部荷载(图 1);试验材料参数见表 1。

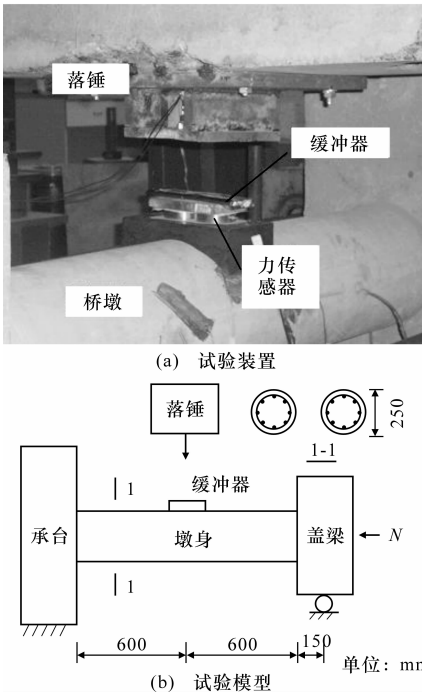


图 1 落锤撞击桥墩试验模型

表 1 桥墩模型材料参数

试件	纵筋	箍筋	钢筋抗拉强度/MPa	混凝土抗压强度/MPa	轴力/kN
墩-1	8Φ16	Φ12@80	370	51.3	260
墩-2	Φ12				
墩-3	16				300

鉴于城市桥梁尺寸要求的局限性,本文设计几种薄壁钢管组合结构的小型缓冲器:外部为矩形薄壁钢管,内填充圆形薄壁钢管耗能元件。缓冲器固定在桥墩表面,在撞击过程中,通过其塑性压缩变形吸收落锤冲击能量,延长撞击作用时间,从而对桥墩起到防护作用;同时又可模拟汽车前部保险杠的变形刚度。缓冲器构造如图 2 所示。

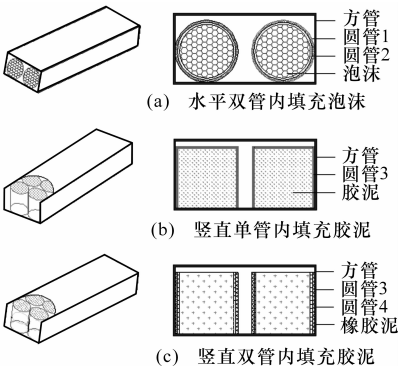


图 2 缓冲器构造

侧向撞击试验步骤如下:①变化缓冲器种类及落锤冲击高度,对比不同缓冲器的耗能效果,以及对桥墩动态力学响应的影响;②在落锤不同冲击高度下,得到撞击力、落锤加速度、钢筋及混凝土应变时程曲线及桥墩破坏模式等,研究桥墩在侧向撞击下的动态力学性能。在试验基础上,分析钢筋混凝土圆形桥墩撞击破坏机理,缓冲器的减撞和耗能效应,为桥墩耐撞性设计和防护提供试验依据。

由于材料应变率效应,撞击下桥墩动态响应与静载状态有所不同,随着落锤冲击速度的提高,桥墩局部损伤严重,对其裂缝发展及破坏模式产生显著影响。

2 钢筋混凝土圆形桥墩撞击破坏模式

2.1 钢筋混凝土圆形桥墩静力性能

对于钢筋混凝土圆形截面正截面强度计算,《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG D62—2004)(以下简称《桥规》)推荐了一种算法:沿圆周均匀分布的单根钢筋等效为薄壁钢环,受压区混凝土采用矩形应力图。

对于轴力 N 作用下钢筋混凝土圆形截面斜截面强度,目前通常认为由轴压贡献值 V_N 、混凝土贡献值 V_c 及箍筋贡献值 V_s 这 3 部分组成,文献[1-2]建议的经验公式为

$$V_u = \frac{1.75}{\lambda + 1} f_t 1.76r \times 1.6r + f_{yv} \frac{A_{sv}}{s} 1.6r + 0.07N \tag{1}$$

$$V_u = 0.134 \times (1 + 0.0725 \frac{N}{A}) \sqrt{f_c} D^2 + 0.418 \frac{A_{sv} f_{yv}}{s} D \tag{2}$$

$$V_u = \frac{0.1}{\lambda + 0.5} f_c D^2 + \frac{\pi}{2} \frac{A_{sv} f_{yv}}{s} D' + 0.083N \tag{3}$$

$$V_u = \frac{0.21}{\lambda} f_c D \bar{h}_0 + 1.0 f_{yv} \frac{A_{sv} \sin(\theta)}{s} \bar{h}_0 + 0.05 N$$

(4)

式中: V_u 为圆形截面斜截面强度; λ 为计算截面剪跨比; r 、 D 、 D' 分别为截面半径、直径、箍筋直径(mm); s 为箍筋间距(mm); f_t 、 f_c 、 f_{yv} 分别为混凝土抗拉、压强度设计值和箍筋抗拉强度设计值; \bar{h}_0 为当量有效高度, $\bar{h}_0 = r + 2r_s/\pi$; A_{sv} 为箍筋截面面积(mm^2); θ 为箍筋与构件轴线的夹角。

由结构力学模型计算桥墩破坏时的侧向荷载为

$$F = \begin{cases} \frac{2l^3}{a^2 b (3l - a)} M_{cu'} & (\text{弯曲破坏}) \\ \frac{2l^3}{b (3l^2 - b^2)} V_{u'} & (\text{剪切破坏}) \end{cases}$$

(5)

式中: $M_{cu'}$ 、 $V_{u'}$ 分别为圆形截面桥墩正截面、斜截面极限承载力; a 、 b 分别为装机点至墩底、墩顶的距离; l 为桥墩有效高度。

本文模型中, $a = 600 \text{ mm}$, $b = 675 \text{ mm}$, $l = 1\,275 \text{ mm}$ 。

2.2 钢筋混凝土圆形桥墩模型破坏模式

定义抗剪-抗弯能力比 α 为

$$\alpha = V_{us} / P_{us}$$

(6)

式中: V_{us} 为抗剪承载力; P_{us} 为抗弯承载力。

桥墩抗剪-抗弯能力比见表 2。

表 2 桥墩抗剪-抗弯能力比 α

项目	桥墩-1	桥墩-2	桥墩-3
式(1)	0.80	0.72	0.72
式(2)	0.79	0.69	0.69
式(3)	0.76	0.63	0.63
式(4)	0.61	0.53	0.53
平均值	0.74	0.64	0.64

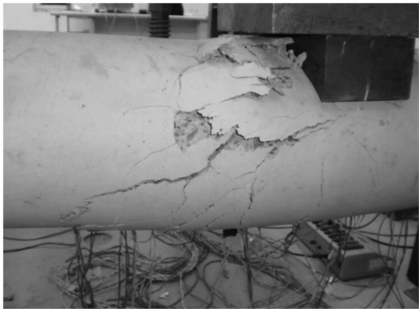
表 2 显示,3 根桥墩均为 $\alpha < 1$,即在侧向静载下抗弯能力强于抗剪,理论上发生剪切破坏。

桥墩破坏模式如图 3 所示。

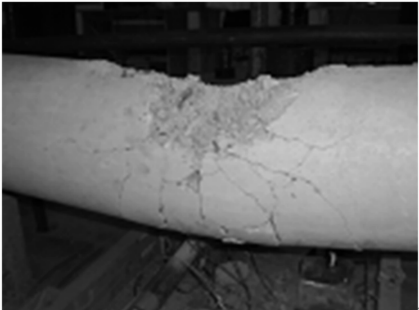
试验结果显示:桥墩-1 剪切破坏与计算一致(图 3(a));撞击荷载作用下,桥墩-2(图 3(b))、墩-3(图 3(c))跨中撞击点附近形成的垂直弯曲裂缝间距与箍筋间距相当,底部混凝土保护层均是以箍筋间距为宽度的条形块脱落,裂缝出现的位置位于箍筋上;侧向撞击下桥墩发生了弯曲破坏,与静力计算不一致。

3 撞击力计算模型

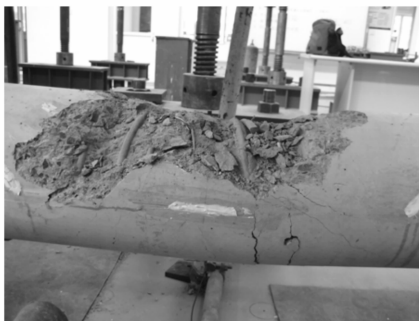
撞击力是桥墩破坏的重要因素,本文分别采用考虑桥墩和车辆的共同变形的双自由度、仅考虑车



(a) 桥墩-1破坏模式



(b) 桥墩-2破坏模式



(c) 桥墩-3破坏模式

图 3 桥墩破坏模式

辆变形的单自由度模型计算撞击力。

3.1 汽车和桥墩简化模型

车辆假定为局部变形的刚体^[3],在低速撞击时车辆会产生一定弹性回弹,鉴于此时对桥墩及车辆自身造成的损伤较小,因此重点考察高速撞击事故。汽车前端局部变形假定为无质量,且只有压缩变形抗力而无恢复力的塑性弹簧,其计算式为

$$k = (0.049\,1\theta^2 + 0.140\theta)m_2$$

(7)

式中: m_2 为汽车质量; θ 为碰撞时的冲击撞角度。

桥墩是典型的压弯构件,但在使用阶段主要承受上部竖向荷载,在碰撞分析中,不考虑上部结构对其水平力作用,桥墩假定为下部与基础固结的悬臂构件,上部荷载作为附加质量 Δm ,则参与振动的桥墩等效质量 m_1 为

$$m_1 = m_0 + \Delta m$$

(8)

式中: m_0 为桥墩自身质量。

桥墩变形刚度长定义为自身抗侧刚度和橡胶支座剪切刚度的组合值,计算式为

$$k_1 = k_d k_z / (k_d + k_z) \tag{9}$$

式中: k_d 为桥墩抗侧刚度, $k_d = 3E_c I_c / l_1^3$, E_c 、 I_c 分别为混凝土弹性模量和换算截面惯性矩,《桥规》规定撞击点高度 $l_1 = 1.2\text{ m}$; k_z 为橡胶支座的剪切刚度。

文献[7] 动力分析表明: 阻尼对系统计算结构影响微小,可以忽略不计; 在车辆桥墩碰撞过程中, 轮胎与地面摩擦力等同撞击力相比微小, 在分析时可将它们忽略,仅考虑撞击力的计算^[8]。

3.2 双自由度模型

双自由度力学模型如图 4 所示。

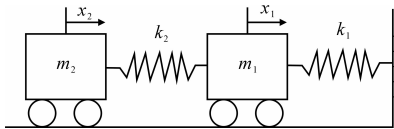


图 4 一维碰撞双自由度力学模型

图 4 中: m_1 、 k_1 、 x_1 分别为桥墩等效质量、变形刚度和位移; m_2 、 k_2 、 x_2 分别为车辆质量、局部变形刚度和前端位移。

根据达朗贝尔原理,建立汽车和桥墩系统的碰撞动力学方程(车辆初始速度为 v_0) 为

$$\left. \begin{aligned} m_1 \ddot{x}_1 + k_1 x_1 - k_2 (x_2 - x_1) &= 0 \\ m_2 \ddot{x}_2 + k_2 (x_2 - x_1) &= 0 \\ t = 0, x_1 = x_2 = 0, \dot{x}_1 = 0, \dot{x}_2 &= v_0 \end{aligned} \right\} \tag{10}$$

则撞击力为

$$F(t) = \frac{k_2 v_0}{B_2 - B_1} \left[\frac{B_1 - 1}{\omega_1} \sin(\omega_1 t) - \frac{B_2 - 1}{\omega_2} \sin(\omega_2 t) \right] \tag{11}$$

式中: 系统自振频率 ω (ω_1 或 ω_2) 为

$$\omega_{1,2}^2 = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right) \pm \sqrt{\left(\frac{k_1 + k_2}{m_1} + \frac{k_2}{m_2} \right)^2 - \frac{4k_1 k_2}{m_1 m_2}} \right];$$

振幅比 B_1 、 B_2 分别为

$$B_1 = \frac{m_1 \omega_1^2 - k_1 - k_2}{-k_2}, B_2 = \frac{m_1 \omega_2^2 - k_1 - k_2}{-k_2}。$$

3.3 单自由度模型

与汽车前端局部变形刚度相比,桥墩变形刚度较大,碰撞中变形微小,此时,车桥碰撞可简化为汽车与静止的刚性体的碰撞,采用单自由度模型,如图 5 所示。

根据达朗贝尔原理,建立汽车和桥墩系统的碰撞动力学方程(车辆初始速度为 v_0) 为

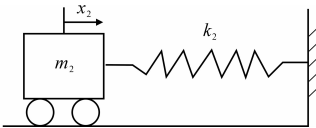


图 5 一维碰撞单自由度力学模型

$$\left. \begin{aligned} m_2 \ddot{x}_2 + k_2 x_2 &= 0 \\ t = 0, x_2 = 0, \dot{x}_2 &= v_0 \end{aligned} \right\} \tag{12}$$

则撞击力为

$$F(t) = k_2 \frac{v_0}{\omega} \sin(\omega t) \tag{13}$$

系统自振频率 $\omega = \sqrt{k_2 / m_2}$ 。

3.4 撞击力分析

桥墩变形刚度 $k_1 = E_c I_c \frac{12l^3}{4a^3 l^3 - a^4 (3l - a)^2}$, 选用

不同规格和类型的薄壁钢管组合元件,可模拟车辆前端局部变形刚度,文献[9] 建议了薄壁钢管耗能元件平均压缩刚度即车辆局部变形刚度 k_2 。

碰撞试验中,系统基本参数见表 3;撞击力测量采用 KD2000 系列石英压力传感器,得到工况 1、工况 2 和工况 3 的时间步长 $\Delta t = 0.001\text{ s}$ 的撞击力 F - t 时程曲线,如下页图 6 所示;根据本文单自由度和双自由度模型,在 Matlab 计算分析中采用相等时间步长计算撞击力,结果见表 4、表 5。

表 3 碰撞系统基本参数

参数	工况 1	工况 2	工况 3
$v_0 / (\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	1.42	2.42	3.43
m_0 / kg		372	
$\Delta m / \text{kg}$		25 898	
m_1 / kg		26 270	
$k_1 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$		4.95×10^8	
m^2 / kg		542	
$k_2 / (\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$	2.61×10^6	7.12×10^6	10.99×10^6

注: $v_0 = \sqrt{2gh}$, h 为落锤高度; $\Delta m = N/g$, N 为轴力, g 为重力加速度。

表 4 撞击力峰值

工况	峰值/kN			峰值误差/%	
	试验	双自由度	单自由度	双自由度	单自由度
工况 1	44.3	51.3	53.0	15.8	19.6
工况 2	125.5	149.4	150.4	19.1	19.6
工况 3	312.9	262.3	264.7	-16.2	-15.4

表 5 撞击力平均值

工况	平均值/kN			平均值误差/%	
	试验	双自由度	单自由度	双自由度	单自由度
工况 1	44.3	32.7	33.5	27.2	30.4
工况 2	125.5	94.9	95.7	18.6	19.6
工况 3	312.9	167.1	168.7	14.5	15.6

计算结果显示: 单自由度模型计算峰值、平均值与试验结果最大误差分别为 19.6% 和 30.4%; 双自

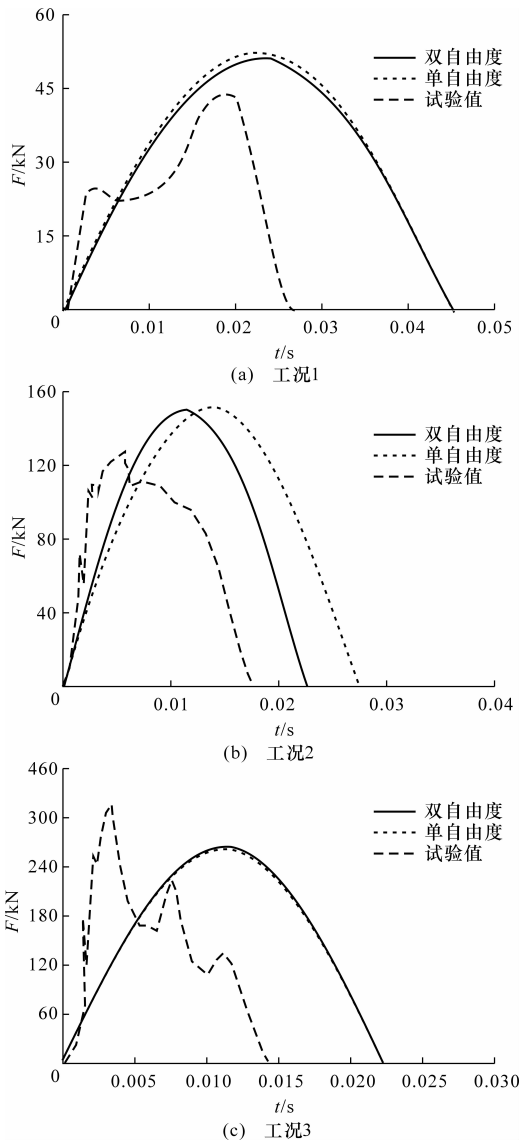


图 6 撞击力计算

由度分别为 19.1%和 27.2%。在撞击力求解中,简化的单自由度模型与双自由度模型计算结果基本吻合,最大相对误差仅为 3.2%。在撞击力分析中,可选用计算较为简单的单自由度模型。因此,一维碰撞中的单自由度简化是可行的。撞击力计算值与试验结果在速度越大时趋向吻合,在低速落锤试验中,缓冲器刚度相对较大时会产生一定量的回弹,造成理论值与试验值出现较大偏差;对于碰撞作用时间取值,撞击试验中落锤与桥墩出现连续几次渐弱的弹跳碰撞,此处仅取第一个主应力-位移时程曲线波,因此碰撞作用时间显示较小。

4 桥墩动态力学性能分析

由于材料的应变率效应,撞击作用下桥墩表现出与静态不同的力学性能。目前的研究证实:动载

作用下的钢筋混凝土构件正截面抗弯承载力的计算,可采用静载作用下的通用计算公式,只需要将材料强度考虑为快速变形下的动态强度^[10]。

4.1 撞击作用下材料应变率 $\dot{\epsilon}$

材料动态力学性能参数的分析计算通常采用率型经验公式,目前对钢筋、混凝土获得系统研究结论的主要有以下 2 种:欧洲混凝土委员会 CEB 规范推荐公式、朱伯龙和刘祖华经验公式,将材料提高系数 $k(\dot{\epsilon})$ 定义为应变率 $\dot{\epsilon}$ 的函数,因此对材料应变率的计算变得至关重要^[11-12]。

文献[10]曾列举材料应变速度的典型值,即应变率是应变在时间上的增量,因此可定义冲击荷载作用下的平均应变率为

$$\dot{\epsilon} = \frac{\epsilon}{t} \tag{14}$$

式中: ϵ 为材料在冲击荷载下的极限应变,且 $\epsilon = f(\dot{\epsilon})$; t 为材料在冲击荷载下的响应时间。

式(14)迭代计算中材料的初始应变,初步建议钢筋取屈服应变;混凝土取极限应变 0.003 3。动态极限应变的求解 $\epsilon = f(\dot{\epsilon})$,可借鉴前文提到的相关率型经验公式。

4.2 材料响应时间 t

本文求解撞击力 $F(t) = k_2 \frac{v_0}{\omega} \sin(\omega t)$,与汽车质量及前端局部变形刚度有关,据此,当 $F(t)$ 为最大值时,可求解汽车与桥梁碰撞撞击力达到峰值的作用时间;当 $F(t)$ 为 0 时,可求解汽车与桥梁碰撞整体过程的作用时间结果见下页表 6。鉴于本节重点分析材料动态应变率,因此,表 6 中选用的是试验结果材料应变时程全过程的响应时间,钢筋应变时程曲线如图 7 所示。

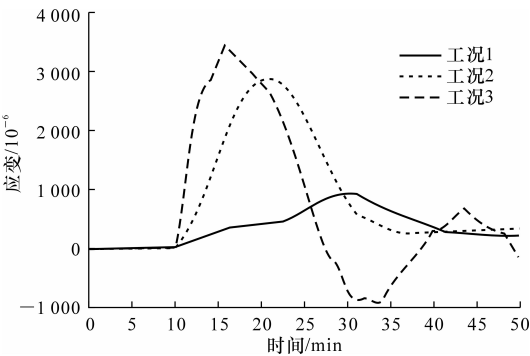


图 7 钢筋应变时程曲线

表 6 显示:车桥撞击中,外部碰撞时间与桥墩材料动态响应时间具有一致性,本文的最大误差为 14.6%,文献[12]数据显示为 21.2%。分析结果可

表 6 碰撞作用时间

工况		缓冲器刚度/ (N·m ⁻¹)	频率/ s ⁻¹	作用时间 t/s		相对误差/%
				外部撞击 理论值	材料响应 试验值	
本文	工况 1	2.606×10 ⁶	69.4	0.045 2	0.042 2	7.1
	工况 2	7.120×10 ⁶	114.6	0.027 4	0.025 8	6.2
	工况 3	10.990×10 ⁶	142.4	0.022 0	0.019 2	14.6
文献 [9]	工况 1	7.828×10 ⁶	120.2	0.026 2	0.029 2	-10.3
	工况 2	6.166×10 ⁶	106.7	0.029 4	0.028 3	3.9
	工况 3	13.827×10 ⁶	159.7	0.019 6	0.017 1	14.6
	工况 4	13.214×10 ⁶	156.1	0.020 2	0.025 0	-19.2
	工况 5	12.528×10 ⁶	152.0	0.020 6	0.017 0	21.2
	工况 6	11.500×10 ⁶	145.7	0.021 6	0.023 5	-8.1
	工况 7	8.836×10 ⁶	127.7	0.024 6	0.028 5	-13.7

注:表中 t 的试验值取自纵向受拉钢筋 $\epsilon-t$ 时程曲线。
为钢筋混凝土桥墩动态力学性能分析及抗撞设计时动态应变率计算提供参考依据。

5 结 语

- (1)撞击作用下,钢筋混凝土桥墩破坏模式与抗剪-抗弯能力比 α 、撞击力、材料动态力学性能相关。
- (2)车桥碰撞的动力学分析中,在低速状态下,采用单自由度模型和双自由度模型计算撞击力相对误差仅为 3.2%,因此,简化分析中可以采用较为简单的单自由度模型。
- (3)将桥梁上部荷载等效为桥墩附加质量,计算所得撞击力峰值、平均值与桥墩模型侧向撞击试验值基本吻合,工况 3 中的误差分别为 -15.4% 和 14.5%,可满足工程精度要求。
- (4)材料平均应变率计算中,单自由度模型计算外部撞击时间与材料动态响应时间误差为 14.6%,基本吻合,可为车桥撞击分析提供参考。

参考文献:

References:

[1] Bantia N P,Sidney M,Arnon B. Impact behaviour of concrete beams[J]. Materials and Structures,1987,20 (4):293-302.

[2] Yoshikazu S,Haruji T,Yoshiyuki K,et al. Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 179 (2):157-177.

[3] 赵 鸣,张 誉. 汽车冲撞钢筋混凝土护栏系统的力学模型及仿真计算[J]. 土木工程学报,1994,27(6): 56-61.

ZHAO Ming,ZHANG Yu. Dynamic model and simulation of vehicle reinforced concrete guardrail system [J]. China Civil Engineering Journal,1994,27(6):56-61.

[4] 张 誉,赵 鸣. 汽车冲撞刚性护栏冲击力的计算 [J]. 土木工程学报,1995,28(6): 37-42.

ZHANG Yu, ZHAO Ming. Study on calculation methods for vehicle impact force acting on RG barrier [J]. China Civil Engineering Journal,1995,28(6):37-42.

[5] 刘佳林,赵 强,甘 英,等. 汽车撞击城市立交桥墩后对桥墩结构的影响[J]. 交通标准化,2005(8):169-171.

LIU Jia-lin,ZHAO Qiang,GAN Ying,et al. Influence on the structure of municipal bridge pier crashed by trucks[J]. Communication Standardization,2005(8): 169-171.

[6] 石红星,白书峰,吕伟民. 车与混凝土护栏碰撞的冲击力简化模型[J]. 公路交通科技,2002,19(2):114-116.

SHI Hong-xing,BAI Shu-feng,LU Wei-min. Crash force model of car to concrete barrier[J]. Journal of Highway and Transportation Reseach and Development,2002,19(2):114-116.

[7] 姚启明,俞卫春,靳欣华. 汽车与防撞护栏的碰撞运动研究[J]. 交通与运输:学术版,2005(1):94-96.

YAO Qi-ming,YU Wei-chun,JIN Xin-hua. Study on the crash movement between vehicles and crashworthy barriers[J]. Traffic & Transportation,2005(1): 94-96.

[8] 黄世霖,张金换,王晓冬. 汽车碰撞与安全[M]. 北京:清华大学出版社,2000.

[9] 许 琦. 侧向冲击荷载下钢筋混凝土圆形桥墩动力性能研究[D]. 南京:南京工业大学,2009.

[10] 过镇海,时旭东. 钢筋混凝土原理和分析[M]. 北京:清华大学出版社,2003.

[11] 宁建国,商 霖,孙远翔. 混凝土材料动态性能的经验公式、强度理论与唯象本构模型[J]. 力学进展,2006, 36(3):389-404.

NING Jian-guo,SHANG Lin,SUN Yuan-xiang. The developments of dynamic constitutive behavior of concrete[J]. Advances in Mechanics,2006,36(3):389-404.

[12] 阎 石,张 亮,王 丹. 钢筋混凝土板在爆炸荷载作用下的破坏模式分析[J]. 沈阳建筑大学学报:自然科学版,2005,21(3):177-180.

YAN Shi,ZHANG Liang,WANG Dan. Failure mode analysis for RC slab under explosive loads[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute,2005,21(3):177-180.