

施有志,林四新,叶代成.汽车冲击荷载下自行车桥墩的受力变形分析[J].地震工程学报,2019,41(5):1114-1120.doi:10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1114

SHI Youzhi, LIN Sixin, YE Daicheng. Stress and Deformation Analysis of Bicycle Bridge Piers under Vehicle Impact Loads[J]. China Earthquake Engineering Journal, 2019, 41(5): 1114-1120. doi: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1114

汽车冲击荷载下自行车桥墩的受力变形分析

施有志¹, 林四新², 叶代成³

(1. 厦门理工学院 土木工程与建筑学院, 福建 厦门 361021;

2. 中交第三航务工程局有限公司厦门分公司, 福建 厦门 361003;

3. 厦门市市政建设开发总公司, 福建 厦门 361009)

摘要: 为了解不同撞击力下厦门市自行车桥钢管混凝土桥墩的受力变形情况, 基于美国 AASHTO 规范设计公式, 计算小轿车、轻型汽车、中型汽车和重型汽车分别以 40 kN/h、60 kN/h、80 kN/h、100 kN/h 和 120 kN/h 不同撞击速度下对应的 20 个冲击荷载, 并运用 SAP2000 有限元软件建立自行车高架桥三维模型进行模拟分析, 结果表明: 桥墩受小轿车和轻型货车冲击荷载作用时桥墩总体仍处于弹性状态; 当中型货车以 ≥ 100 km/h、重型货车以 100 km/h 撞击时, 桥墩局部进入塑性状态且最大塑性转角分别为 0.28×10^{-3} rad 和 0.64×10^{-3} rad, 但整体塑性变形在可控范围内; 当重型货车以 120 km/h 撞击时, 桥墩较大范围进入塑性阶段且很可能会直接影响桥梁的正常使用功能。

关键词: 自行车桥; 车辆类型; 撞击速度; 冲击荷载; 桥墩

中图分类号: U448.15

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2019)05-1114-08

DOI: 10.3969/j.issn.1000-0844.2019.05.1114

Stress and Deformation Analysis of Bicycle Bridge Piers under Vehicle Impact Loads

SHI Youzhi¹, LIN Sixin², YE Daicheng³

(1. School of Civil Engineering and Architecture, Xiamen University of Technology, Xiamen 361021, Fujian, China;

2. Xiamen Branch, CCC Third Harbor Engineering Co., Ltd., Xiamen 361003, Fujian, China;

3. Xiamen Municipal Construction and Development Corporation, Xiamen 361009, Fujian, China)

Abstract: To analyze the deformation of concrete-filled steel tubular piers of bicycle bridges under different impact forces in Xiamen City, Fujian Province, 20 impact loads corresponding to different impact velocities of 40, 60, 80, 100, and 120 kN/h, from cars, light vehicles, medium vehicles, and heavy vehicles were calculated based on AASHTO code design formulas in America. A three-dimensional model of a bicycle viaduct is established using SAP2000 finite-element software. The results show that the pier is still in an elastic state when it is subjected to the impact load of a car and light truck. Under the impact of a medium-size truck with velocity ≥ 100 km/h or that of a heavy truck with velocity = 100 km/h, the pier enters the plastic state and the maximum plastic rotation angle is $0.28E-3$ rad and $0.64E-3$ rad, respectively, but the overall plastic

收稿日期: 2019-01-20

基金项目: 厦门市科技计划项目(3502Z20183043)

第一作者简介: 施有志(1976-), 男, 教授, 主要从事城市基础设施防灾减灾方面的研究。E-mail: 2013110907@xmut.edu.cn.

deformation is within the controllable range. When a heavy truck impacts with 120 km/h, the pier will enter the plastic stage in a large range, and this will probably directly affect the normal service function of the bridge.

Keywords: bicycle bridge; vehicle type; impact velocity; impact load; bridge pier

0 引言

随着城市化进程持续发展,汽车尾气及噪声污染、交通拥挤等一系列问题^[1]越发严重,近年来国内外许多城市建设享有独立行驶路权的自行车道^[2-3]以推进实现“绿色交通”^[4]。为合理利用交通用地资源,部分国外城市采取高架桥模式发展自行车交通,如阿姆斯特丹^[5]和哥本哈根^[6]。城市自行车桥周边环境复杂,人流量多,且其线路长,被汽车撞击概率较大,一旦发生车桥碰撞,将严重威胁人身安全,影响城市交通的正常运行。因此急需针对汽车撞击自行车桥的问题开展相关研究。关于计算汽车冲击荷载的常用方法包括拟静力法、质量-弹簧模型动力分析法、能量理论法、试验研究法^[7-8]及数值分析法。其中采用非线性动力有限元程序对桥梁结构冲击响应问题进行时程分析的数值分析法是车桥碰撞问题动力分析的重要工具,如何水涛等^[9]通过动力非线性有限元对超高罐车撞击钢箱梁桥和钢板梁桥的撞击试验进行数值模拟,分析不同桥型在超高车辆的撞击下的破坏模式,得出钢箱梁桥以整体变形为主,钢板梁桥以局部冲切变形为主的结论;王天^[10]通过有限元模拟不同车速汽车产生冲击荷载对桥梁撞击的全过程,研究桥梁被撞后的动态变形及应力变化历程,同时对桥梁损伤程度进行评估;田力等^[11-12]运用 LS-DYNA 软件建立精细化预应力箱型梁桥上部结构的三维分离式模型和车辆与桥梁上部结构的耦合模型,分析不同撞击位置、不同车速时桥梁上部结构遭受超高车辆撞击的动态响应;崔堃鹏等^[13]应用 ANSYS 软件模拟车辆以 4 种速度撞击桥墩全过程,获得撞击面撞击力时程及峰值,研究汽车撞击高速铁路桥墩瞬态撞击力特性。目前研究多集中在分析不同撞击位置、不同车速情况下桥梁的动力响应,鲜见共同考虑车辆类型和撞击速度的相关报道,更没有涉及对于撞击对象为自行车桥的研究。

基于此,本文通过中美规范规定的设计公式计算获得不同车型及不同撞击速度对应的冲击荷载。基于保守原则,选定 AASHTO 规范作为本次加载依据,借助有限元软件 SAP2000 建立厦门市自行车桥的三维模型,模拟计算不同冲击荷载下桥墩剪力、弯矩和弹塑性响应,总结出一些对该类型桥梁设计

和撞击研究有参考价值的结论。

1 汽车冲击荷载的取值

汽车冲击荷载以节点力荷载作为施加方式,节点力大小由车辆类型(质量参数)及撞击速度为参数根据设计公式计算求得。

1.1 车辆类型及撞击速度

汽车节点荷载的施加位置主要依据车辆类型有所变化。车辆主要可分为小汽车、轻型货车、中型货车和重型货车 4 类车型。不同车辆指标也不同,如小轿车重一般为 1.5 t,冲击荷载施加高度为距墩底 0.6 m 位置处;轻型货车重量典型值为 4.5 t 左右,撞击部位高度为距墩底 0.8 m;中型货车重量典型值为 12 t,撞击部位高度为距墩底 1.2 m;重型货车重量典型值为 30 t,撞击部位高度为距墩底 1.3 m(表 1)。车辆的撞击速度主要可分为 40 kN/h、60 kN/h、80 kN/h、100 kN/h 和 120 kN/h 5 类。

表 1 主要车辆分类表

Table 1 Classification of major vehicles

车辆类型	小轿车	轻型货车	中型货车	重型货车(3 轴)
汽车质量/t	1.5	4.5	12	30
撞击高度/m	0.6	0.8	1.2	1.2

1.2 现有规范设计公式

1.2.1 美国 AASHTO 桥梁规范

美国联邦公路与运输协会推出的指南 AASHTO^[14]提出荷载碰撞导致的冲击荷载经验公式如式(1),可用于估算正面撞击刚性桥墩的等效静定荷载 P_s :

$$P_s = 0.98(DWT)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{v}{8} \right) \quad (1)$$

式中: P_s 为碰撞荷载等效静力荷载(MN); DWT 为碰撞汽车的吨位(t); v 为汽车的碰撞速度(m/s)。

1.2.2 我国铁路桥涵设计规范

我国铁路桥涵设计基本规范^[15]未明确给出车辆撞击桥梁的撞击力设计公式,但规定船舶撞击桥梁墩台的撞击力定义为特殊荷载。其公式为:

$$F = \gamma v \sin \alpha \sqrt{\frac{W}{C_1 + C_2}} \quad (2)$$

式中: F 为撞击力(kN); γ 为动能折减系数($s/m^{\frac{1}{2}}$);

v 为船只或排筏撞击墩台时的速度(m/s); α 为船只或排筏驶近方向与墩台撞击点处切线所成的夹角; W 为船只重或排筏重(kN); C_1 、 C_2 分别为船只或排筏的弹性变形系数和墩台圬工的弹性变形系数。

1.3 两种设计公式计算的冲击荷载值对比

根据上述车辆参数和设计公式,按不同规范计

算得到不同车型对应不同车速时冲击荷载的大小(表2)。

从表2可以看出,AASHTO规范中定义的冲击荷载远大于我国铁路桥涵规范中定义的冲击荷载值,ASSHTO规范中规定的车辆撞击力为中国规范中规定数值的8.5倍左右。

表2 不同规范对不同车辆以不同速度撞击时的冲击荷载(单位:MN)

规范	撞击速度 /(km·h ⁻¹)	车辆类型			
		小轿车	轻型货车	中型货车	重型货车
美国 AASHTO 桥梁规范	40	1.67	2.89	4.72	7.46
	60	2.50	4.33	7.07	11.18
	80	3.33	5.77	9.43	14.91
	100	4.17	7.22	11.79	18.64
	120	5.00	8.66	14.15	22.37
铁路桥涵设计规范	40	0.20	0.34	0.55	0.87
	60	0.29	0.51	0.83	1.31
	80	0.39	0.68	1.11	1.75
	100	0.49	0.85	1.38	2.19
	120	0.59	1.02	1.66	2.62

2 工程背景

厦门市自行车高架桥位于厦门岛东部云顶路段,全线桥段共80联,约7.5 km,标准跨径30 m,为独墩连续梁体系。墩柱采用钢管混凝土结构形式,外表面为20厚Q345圆钢管,内填充C30微膨胀混凝土;截面直径1.2 m,高度1~8 m。鉴于该桥址处于城市中心地带,且墩柱数量计300根,被汽车撞击的概率大幅增加。因此很有必要研究不同类型汽车、不同撞击速度对自行车桥墩柱结构内力及变形的影响。

3 数值模型设计

借助有限元软件通过瞬态动力学及接触分析等方法精细化地分析特定质量和速度的车辆撞击桥梁的全受力过程。限于篇幅,选取自行车桥第21联进行计算。

3.1 桥墩模型

采用有限元分析程序SAP2000构建自行车桥第21联桥墩三维模型,墩柱高6.5 m(图1)。将桥墩结构外表面的钢管通过面积和惯性矩等效为混凝土,从宏观上考虑全截面内力在冲击作用下的响应。通过杆单元模拟桥墩,按其实际尺寸和混凝土等级确定计算参数:重度 $\gamma=2.5 \times 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}^{-3}$ 、密度 $\rho=2.55 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ 、弹性模量 $E=3.0 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、剪切模量 $G=1.25 \times 10^{10} \text{ Pa}$ 、泊松比 $\nu=0.2$ 、线膨胀系数 $\alpha=1.0 \times 10^{-5} 1/^\circ\text{C}$ 。网格划分以四边形为主,局

部过度区域为三角网格,最大网格划分尺寸为1.0 m,共划分402个单元。



图1 桥墩三维模型图

Fig.1 3D model of pier

3.2 模拟工况

通过1.3节中美国AASHTO规范冲击荷载结果值的对比,基于保守原则,最终选取其计算的冲击力作为计算工况的冲击荷载,共考虑20个模拟工况(表3)。

表3 模拟工况

编号	车辆类型	撞击速度/(km·h ⁻¹)
1~5	小轿车	40,60,80,100,120
6~10	轻型货车	40,60,80,100,120
11~15	中型货车	40,60,80,100,120
16~20	重型货车	40,60,80,100,120

4 计算结果分析

4.1 不同冲击荷载下桥墩剪力变化

水平剪力结果能够最直接地反映冲击荷载对桥梁的影响。不同类型车辆以 40~120 km/h 的速度

撞击桥墩时水平剪力随时间变化曲线如图 2 所示(其中重型货车以 120 km/h 速度撞击桥墩时,桥墩结构已较大范围进入塑性阶段,未得到收敛解,因此结果未列出)。

从图2(a)、(b)可以看出,不同速度下剪力变化

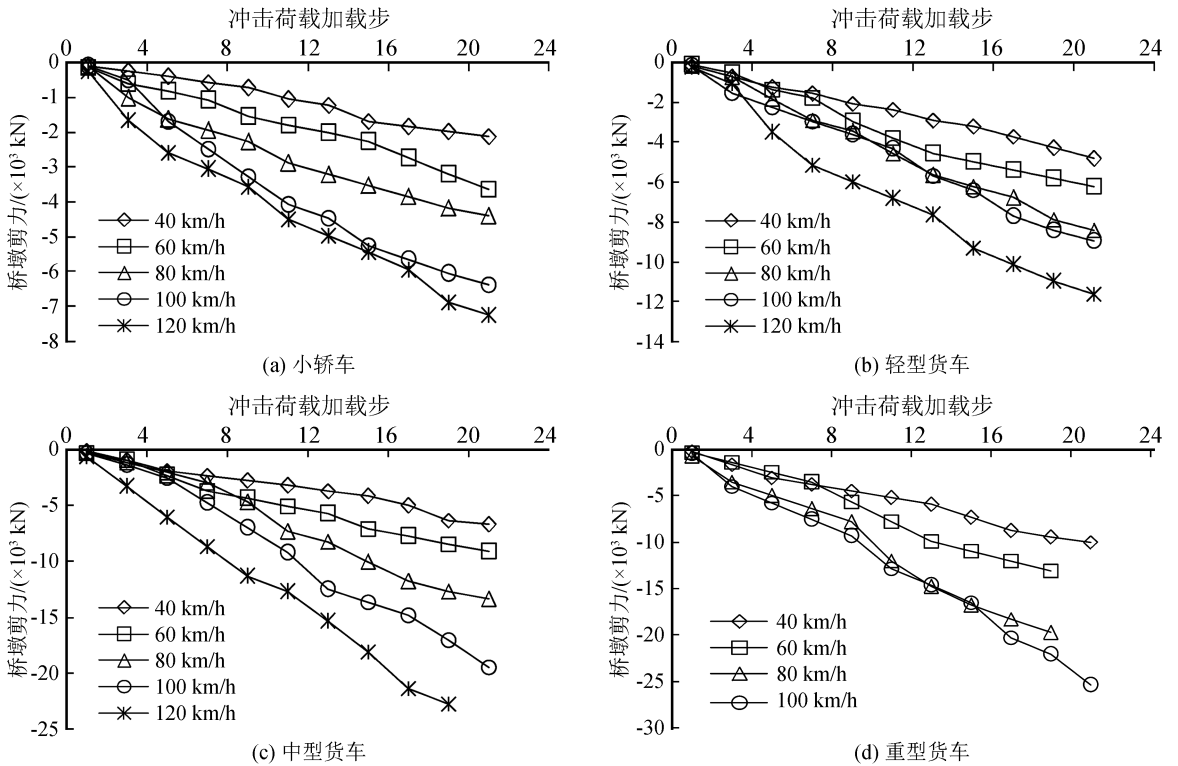


图 2 不同车辆类型冲击荷载下桥墩剪力随加载步变化曲线

Fig.2 Change curves of shear force of pier with loading step under impact loads of different vehicles

曲线斜率随着荷载步增加呈统一的减小趋势。抗剪刚度在加载过程中逐渐减小,其中 120 km/h 有三段明显的斜率变化段,第 18 荷载步时斜率最小,该荷载步桥墩的抗剪刚度也最小,此时小轿车和轻型货车冲击荷载下对应的桥墩最大剪力分别为 7 248 kN 和 11 612.8 kN。整个过程中桥墩对象有部分区域进入非线性塑性变形阶段,整体上曲线趋于直线,说明仍然具有较好的抗剪刚度。

由图 2(c)、(d)可知,桥墩剪力曲线斜率和抗剪刚度变化趋势同图 2(a)、(b),均表现为逐渐减小。中型货车以 120 km/h 速度撞击时桥墩剪力有三段明显的斜率变化段,斜率最小发生于第 16 荷载步,此时抗剪刚度也最小,该荷载步桥墩最大剪力为 23 450.1 kN;重型货车以 100 km/h 速度撞击时桥墩剪力有四段明显的斜率变化段,第 20 荷载步时斜率和抗剪刚度最小,桥墩最大剪力为 25 467.0 kN,其他不同撞击速度冲击荷载工况下,桥梁剪力随荷载步的变化曲线趋势同 100 km/h 的情况一致。

总体上速度小的曲线刚度衰减没有速度大的曲线衰减大,从侧面可以反映荷载越大,桥墩进入非线性的程度相对也就越大,最终段的曲线斜率和初始曲线斜率比值也就越小。

4.2 不同冲击荷载下桥墩底部弯矩变化

墩底弯矩是衡量车辆撞击力对桥墩影响的另一个重要指标。不同类型车辆以 40~120 km/h 的速度撞击桥墩时墩底弯矩随时间变化曲线如图 3 所示(其中重型货车以 120 km/h 速度撞击桥墩时,桥墩受到整体性损伤而未得到收敛解)。

从图 3(a)、(b)可以看出,随着撞击速度增大,桥墩底部弯矩逐渐增大,小轿车和轻型货车的变化情况相似;5 种撞击工况的桥墩底部弯矩变化曲线趋势基本一致。还可以看出,两种车型以 120 km/h 撞击时,在端部斜率减小最为明显,第 20 荷载步时斜率最小,抗弯刚度也最小,此时小轿车和轻型货车对应的桥墩底部最大弯矩为 1 684.3 kN·m 和 2 897.8 kN·m。

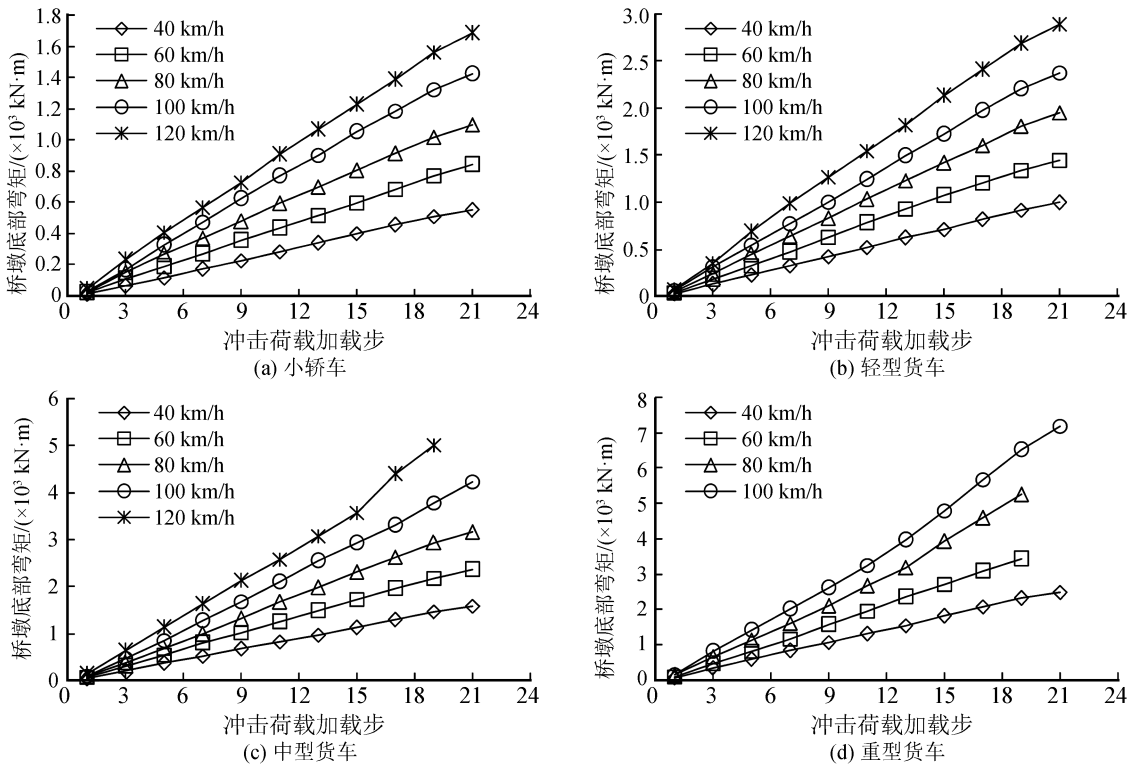


图3 不同类型车辆冲击荷载下桥墩弯矩随加载步变化曲线

Fig.3 Change curves of bending moment of pier with loading step under impact loads of different vehicles

由图3(c)、(d)可知,桥墩底部弯矩变化曲线斜率随荷载步增加逐渐减小。中型货车在120 km/h冲击荷载下,斜率于第15荷载步时出现明显突变;当重型货车以100 km/h撞击时,第20荷载步时斜率最小,此时桥墩抗弯刚度也最小。两种车型受不同速度撞击时桥墩底部对应的最大弯矩分别为5 312.3 kN·m和7 200.9 kN·m,整个过程中桥墩对象有局部区域进入非线性塑性变形阶段,不同的是重型货车冲击下墩底弯矩变化形态带有一定的曲线特点,说明仍然具有较完整的抗弯刚度,但已经存在了一定的刚度折减。

总体上撞击速度小的墩底弯矩变化曲线斜率减小比撞击速度大的更不明显,曲线的最终斜率和初始斜率比值也越小。

4.3 不同冲击荷载下桥墩底部塑性变形

塑性转角是结构进入塑性的重要宏观指标,是从宏观的角度衡量全截面的内力综合指标,可提出截面位置处的总体塑性发展的情况。

不同类型车辆塑性转角随时间变化曲线如图4所示。

通过图4(a)可知,小轿车及轻型货车以40~120 km/h的不同速度撞击桥墩时,桥墩底部截面转

角变形均未进入塑性的情况。可见小轿车以及轻型货车以120 km/h以内的速度撞击时不会对桥墩造成明显的损伤,整体桥墩仍保持为弹性状态。

从图4(b)可以看出,车速为40~80 km/h时,桥墩底部仍保持为弹性,从100 km/h开始桥墩柱底转角变形开始进入塑性。100 km/h速度造成的冲击荷载在第18荷载步时开始进入塑性,整体塑性转角变形较小,最大值为 0.12×10^{-3} rad;120 km/h速度造成的冲击荷载在第15荷载步时开始进入塑性,整体塑性转角变形较小,最大值为 0.28×10^{-3} rad。桥墩整体上基本处于弹性,局部转角轻微进入塑性,但塑性转角相对较小,塑性转角未有进一步发展。整体桥墩的承载力仍处于上升阶段,当冲击荷载卸载后,塑性变形的残余非常小,对桥梁整体承载力基本没有影响。

由图4(c)可知,车速在40 km/h时冲击荷载作用下桥墩仍保持为弹性,但从60 km/h开始桥墩柱底转角变形开始进入塑性。当撞击速度为60 km/h时,桥墩底部于第19荷载步时进入塑性,整体塑性转角变形很小,最大值为 32×10^{-6} rad;当撞击速度为80 km/h时,在第14荷载步时开始进入塑性,塑性转角最大值为 0.3×10^{-3} rad;以100 km/h速度

撞击的冲击荷载在第 12 荷载步时开始进入塑性,塑性转角最大值为 0.64×10^{-3} rad;120 km/h 速度造成的冲击荷载作用下的分析未有收敛的结果,因此 120 km/h 速度造成的冲击荷载应引起足够重视,可能对桥墩结构造成较大损伤,进一步影响桥梁结构的后期使用,应通过其他防撞措施严格限制此种荷载对桥梁造成破坏。

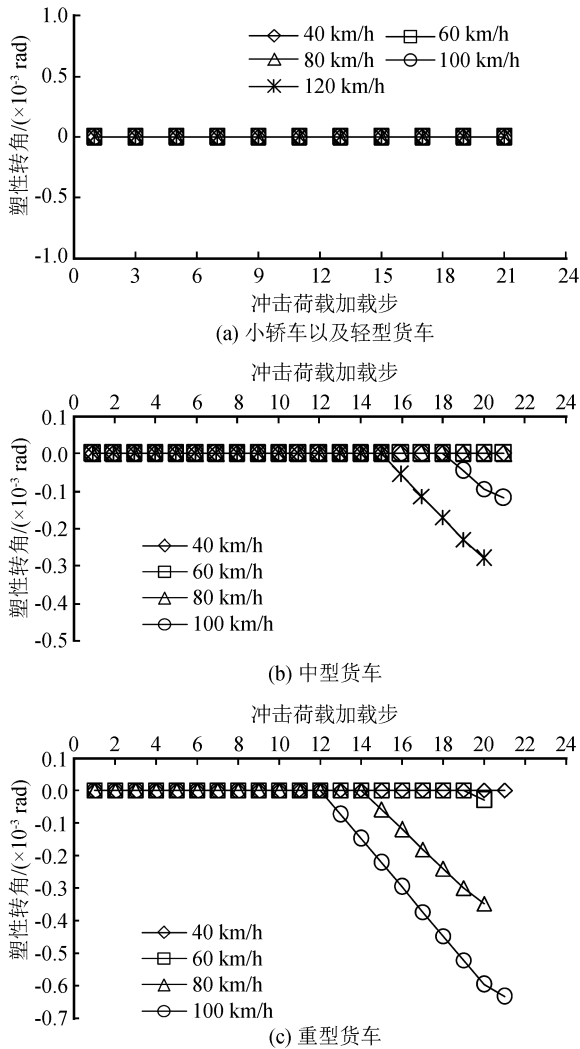


图 4 不同类型车辆塑性转角变化曲线

Fig.4 Plastic rotation angle change curves of different types of vehicles

不同车辆撞击桥墩时的塑性铰分布情况如图 5 所示。

从图 5 可以看出,中、重型货车分别以 120 km/h 和 100 km/h 撞击时,桥墩主体结构均属于局部破坏,但未丧失整理的承载力,塑性铰的颜色均表现为洋红色,结合颜色柱状图可以发现,所有塑性铰的塑形发展阶段处于 IO(立即使用)阶段,未发展至 LS(生命安全)或其他后续阶段(图 6)。由此

说明截面没有进一步塑性发展的趋势,整体承载力并未丧失,但需要对撞击部位的损伤进行评估。本次塑性铰分析过程中未得到重型货车以超过 120 km/h 速度撞击时的收敛解,可见此种荷载工况会导致桥墩进入更大的塑形发展阶段,很可能导致桥梁整体性损伤,甚至发生桥梁坍塌。

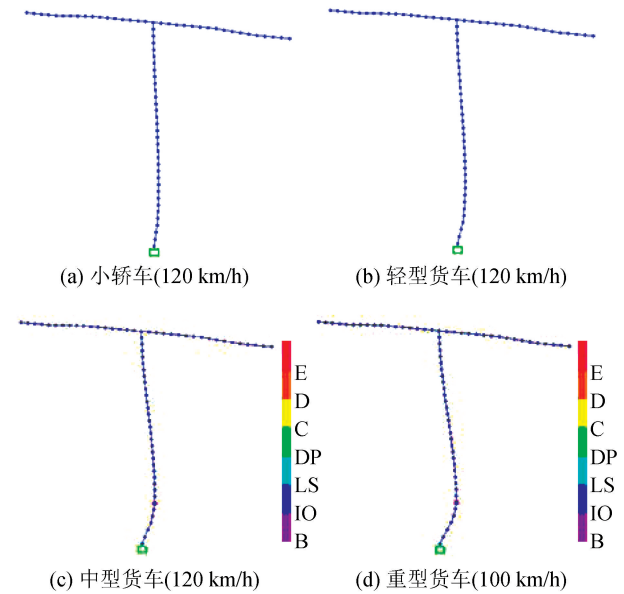


图 5 不同车辆撞击桥墩时的塑性铰分布情况

Fig.5 Distribution of plastic hinge under the impact of different vehicles

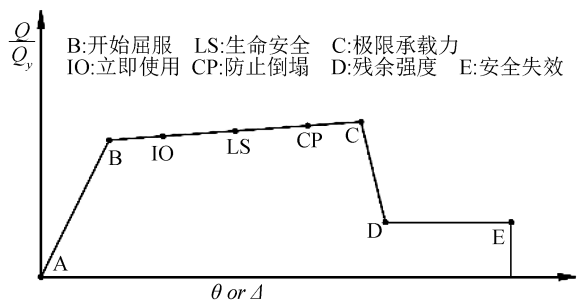


图 6 美国 FEMA356 规范^[16]规定的荷载变形曲线

Fig.6 Load deformation curve specified in code FEMA356^[16]

5 结论与建议

本文通过 AASHTO 规范设计公式确定不同车辆类型和撞击速度的汽车冲击荷载,建立自行车桥三维有限元模型。根据等效冲击荷载对桥梁结构进行非线性的静定分析,研究在等效冲击荷载作用下自行车桥桥墩的变形和受力特性,得到桥墩对象位移和内力分布情况,主要得到以下结论:

(1) 我国规范规定桥梁的冲击荷载远小于美国

规范,建议实际设计时采取美国荷载规范的数值作为补充验算参考,以确保结构设计安全。

(2) 桥墩受小轿车冲击荷载作用时,小轿车以 40~120 km/h 的速度撞击桥墩,桥梁下部结构桥墩均不会进入塑性状态,仅局部应力集中区域发生破坏,不会导致桥墩结构整体进入塑形状态,总体上桥墩仍保持弹性并处于安全状态。

(3) 桥墩受轻型货车撞击时,除撞击部位的局部应力集中导致的破坏外,桥墩整体仍处于弹性,不会导致桥墩主体结构的整体损伤,局部破坏根据实际情况进行适当修补即可。

(4) 桥墩受中型货车冲击荷载作用时,不会导致桥墩失效,局部会有破坏发生。当桥墩受到 100 km/h 以上的冲击荷载作用时局部进入塑性状态,最不利截面的最大塑性转角为 0.28×10^{-3} rad,整体塑性变形在可控范围内,不会导致桥墩的整体失效。

(5) 桥墩受重型货车撞击时,当撞击速度在 100 km/h 以下,不会引起桥墩失效;当桥墩受到 100 km/h 的速度撞击时局部进入塑性状态,最不利截面的最大塑性转角为 0.64×10^{-3} rad,整体塑性变形在可控范围内,不会导致桥墩的整体失效;当重型货车以 120 km/h 撞击桥墩时,桥墩结构已经较大范围进入到塑性阶段,导致有限元求解无法收敛,从侧面可以反映出此种撞击力作用对桥梁结构造成较大的破坏,可能会直接影响桥梁的正常使用功能,甚至引起本桥跨段的桥梁坍塌,应该极力避免此类事故的发生。

参考文献(References)

[1] 《中国公路学报》编辑部.中国交通工程学术研究综述·2016[J].中国公路学报,2016,29(6):1-161.DOI:10.19721/j.cnki.1001-7372.2016.06.001.
Review on China's Traffic Engineering Research Progress:2016[J].China Journal of Highway and Transport,2016,29(6):1-161.

[2] Transport for London.Barclays Cycle Superhighways Routes and Maps[EB/OL].2011[2011-10-31].http://www.tfl.gov.uk/roadusers/cycling/11901.aspx.

[3] 熊文,黎晴,邵勇,等.向世界级城市学习:天津市滨海新区 CBD 慢行交通规划[J].城市交通,2012,10(1):38-53.
XIONG Wen, LI Qing, SHAO Yong, et al. Learning from World Class Cities: Pedestrian and Bicycle Transportation Planning for Central Business District of Tianjin Binhai New Area[J].Urban Transport of China,2012,10(1):38-53.

[4] 吴昊灵,袁振洲,田钧方,等.基于绿色交通理念的生态新区交通规划与实践[J].城市发展研究,2014,21(2):106-111.
WU Haoling, YUAN Zhenzhou, TIAN Junfang, et al. Traffic Planning and Practices of Eco New Area Based on Green Transportation Concept[J].Urban Development Studies,2014,21(2):106-111.DOI:10.3969/j.issn.1006-3862.2014.02.017.

[5] 冯建喜,马汀·戴斯特,扬·普瑞尔维茨.荷兰自行车交通的历史演进及规划设计[J].国际城市规划,2013,28(3):29-35.
FENG Jianxi, DIJST M., PRIUWITZ J. The History of the Bicycle Use and the Related Policies and Designs in the Netherlands[J].Urban Planning International,2013,28(3):29-35.

[6] The City of Copenhagen Technical and Environmental Administration Mobility and Urban Space.The Bicycle Account 2014[R].Copenhagen:The City of Copenhagen Technical and Environmental Administration,2015.

[7] 李界全,张南,高闵.桥墩撞击力计算及影响因素研究[J].公路工程,2018,43(2):23-29.
LI Jiequan, ZHANG Nan, GAO Min. Research on Calculation and Influence Factors of Impact Force of Piers[J].Highway Engineering,2018,43(2):23-29.

[8] 吴长,苟宝龙,李冬杰,等.多点冲击荷载作用下 K_6 型单层球面网壳结构失效机理分析[J].地震工程学报,2018,40(5):969-975.
WU Chang, GOU Baolong, LI Dongjie, et al. Failure Mechanism of K_6 Single-Layer Spherical Reticulated Shell Structures under Multipoint Impact Loads[J].China Earthquake Engineering Journal,2018,40(5):969-975.

[9] 何水涛,陆新征,卢啸,等.超高车辆撞击钢桥上部结构模型试验研究[J].振动与冲击,2012,31(5):31-35.
HE Shuitao, LU Xinzhen, LU Xiao, et al. Tests for Collision between Over-High Trucks and Steel Bridge Superstructures[J].Journal of Vibration and Shock,2012,31(5):31-35.

[10] 王天.汽车冲击荷载对大跨度钢-混凝土组合桁梁桥力学性能的影响[J].甘肃科技,2015,31(10):74-76.
WANG Tian. Effect of Automobile Impact Load on Mechanical Properties of Long-Span Steel-Concrete Composite Truss Bridge[J].Gansu Science and Technology,2015,31(10):74-76.

[11] 田力,冯振宁.超高车辆撞击预应力箱型梁桥上部结构的动态响应[J].西南交通大学学报,2016,51(4):632-638.
TIAN Li, FENG Zhenning. Dynamic Response of Superstructure of Prestressed Box-Girder Bridge to Over-High Truck Impact[J].Journal of Southwest Jiaotong University,2016,51(4):632-638.

[12] 田力,冯振宁.预应力箱型梁桥遭受超高车辆在不同位置撞击下的动态响应[J].土木工程与管理学报,2016,33(1):18-23.
TIAN Li, FENG Zhenning. Dynamic Response of the Prestressed Box Girder Bridge to Over-High Truck Impact under Different Impact Position[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology,2016,33(1):18-23.

- Test Study of Bridge Isolation System (Ⅲ)-An Analysis of Measured Results[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2002,22(2):136-142.
- [82] IEMURA H, TAGHIKHANY T, TAKAHASHI Y, et al. Effect of Variation of Normal Force on Seismic Performance of Resilient Sliding Isolation Systems in Highway Bridges[J]. Earthquake Engineering & Structural Dynamics, 2005, 34(15):1777-1797.
- [83] SAHASRABUDHE S, NAGARAJAIAH S. Effectiveness of Variable Stiffness Systems in Base-Isolated Bridges Subjected to Near-Fault Earthquakes; An Experimental and Analytical-Study[J].Journal of Intelligent Material Systems and Structures,2005,16(9):743-756.
- [84] TSAI M H, WU S Y, CHANG K C, et al. Shaking Table Tests of a Scaled Bridge Model with Rolling-Type Seismic Isolation Bearings[J]. Engineering Structures, 2007, 29(5): 694-702.
- [85] 李忠献,张勇,岳福青,等.地震作用下隔震简支梁桥碰撞反应的振动台试验[J].地震工程与工程振动,2007,27(2):152-157.
- LI Zhongxian, ZHANG Yong, YUE Fuqing. Shaking Table Test on Pounding Isolated Bridges under Responses of Simply Supported Earthquake Excitation[J].Earthquake Engineering and Engineering Vibration,2007,27(2):152-157.
- [86] 韩强,杜修力,刘文光,等.不同地震烈度下隔震连续梁桥模型振动台试验[J].中国公路学报,2008,21(6):50-56.
- HAN Qiang, DU Xiuli, LIU Wenguang, et al. Shaking Table Test of Isolated Continuous Girder Bridge Model under Different Earthquake Intensity Excitations[J].China Journal of Highway and Transport,2008,21(6):50-56.
- [87] 袁涌,熊世树,朱宏平.隔震桥梁地震反应速度控制型实时子结构试验[J].华中科技大学学报(自然科学版),2008,36(8):117-120.
- YUAN Yong, XIONG Shishu, ZHU Hongping. Real-Time Substructure Hybrid Test System for Earthquake Response of Isolated Bridge Using Velocity Control[J].Journal of Huazhong University of Science and Technology (Natural Science Edition),2008,36(8):117-120.
- [88] GUO A X, LI Z J, LI H, et al. Experimental and Analytical Study on Pounding Reduction of Base-Isolated Highway Bridges Using MR Dampers[J].Earthquake Engineering & Structural Dynamics,2009,38(11):1307-1333.
- [89] DION C, BOUAANANI N, TREMBLAY R, et al. Real-Time Dynamic Substructuring Testing of Viscous Seismic Protective Devices for Bridge Structures[J].Engineering Structures, 2011,33(12):3351-3363.

(上接第 1120 页)

- [13] 崔堃鹏,夏超逸,刘炎海,等.高速铁路桥墩汽车撞击力的数值模拟与特性分析[J].桥梁建设,2013,43(6):57-63.
- CUI Kunpeng, XIA Chaoyi, LIU Yanhai, et al. Numerical Simulation and Characteristic Analysis of Vehicle Collision Forces in High-Speed Railway Bridge Pier[J].Bridge Construction, 2013,43(6):57-63.
- [14] Bridge Design Specifications : AASHTO LRFD 2012[S]. Washington D. C. : American Association of State Highway and Transportation Officials, 2012.
- [15] 铁路桥涵设计基本规范:TB 1002.1-2005[S].2010.
- Basic Code for Design of Railway Bridges and Culverts: TB 1002.1-2005[S].2010.
- [16] Prestandard and commentary for the seismic rehabilitation of buildings; FEMA356[S]. Washington D. C. : Federal Emergency Management Agency, 2000.