

基于 Pc-Crash 的车 - 人事故再现

邹铁方¹, 余志², 蔡铭², 刘济科²

(1. 长沙理工大学 汽车与机械工程学院, 长沙 410076; 2. 中山大学 工学院, 广州 510275)

摘要: 提出基于 Pc - Crash 的车 - 人事故再现方法, 即以 Pc - Crash 为仿真平台, 构建事故现场及车、人多刚体模型, 以车、人接触部位及人、车最终停止位置等事故信息为重要证据对事故进行仿真, 并利用人体损伤等其他事故信息验证仿真结果的合理性, 最后利用不确定性分析理论评估所得结果的不确定度。以一车 - 人碰撞事故为例, 演示了该方法的步骤。案例再现分析中, 事故信息都得到合理利用, 并借助响应曲面法与蒙特卡罗方法获得了事故再现结果的分布。算例表明, 利用该方法所得再现结果不仅更为客观, 且能为事故鉴定提供更多有效信息。

关键词: 事故再现; Pc - Crash; 事故信息; 不确定度评估; 仿真

中图分类号: U491.3; TP391.91 **文献标识码:** A

Car-pedestrian accident reconstruction based on Pc-Crash

ZOU Tie-fang¹, YU Zhi², CAI Ming², LIU Ji-ke²

(1. School of Automobile and Mechanical Engineering, Changsha University of Science and Technology, Changsha 410076, China;

2. School of Engineering, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: A car-pedestrian accident reconstruction method based on Pc-Crash was proposed. In the method, Pc-Crash was used as a simulation platform, the accident scene and the car-pedestrian multi-bodies model was constructed, and then accidents were simulated according to contact positions of car-pedestrian and final rest positions of car and pedestrian; further, the rationality of simulation results was validated by some other accident information, e. g., human body injury; finally, uncertainty of simulation results was evaluated by uncertainty analysis methods. The steps of the method were given through an example case of car-pedestrian accident. In the case, all accident information was used reasonably, and the distribution of accident reconstruction result was obtained with the help of response surface method and Monte Carlo method. The case shows that reconstruction results by the method are more objective, and more efficient informations for accident survey can be obtained from these results.

Key words: accident reconstruction; Pc-Crash; accident information; uncertainty evaluation; simulation

近年来, 车 - 人碰撞已经成为道路交通事故的重要表现形式^[1], 加强对车 - 人事故的再现研究, 有利于公平、公正地进行事故责任认定。因而车 - 人事故再现已成为国内外研究的热点问题, 其再现研究的数字化重构方法有弹射和跌落分析、多刚体、有限元和数字假人等方法^[2]。其中后三者一般均需由仿真软件辅助实现, 根据仿真后行人抛距^[3]、车 - 人接触位置、车辆变形^[4]及行人伤害^[1,5]等情况与可获取事故信息的吻合程度而实现事故的再现分析。

Pc-Crash^[6]为国内外应用非常广泛的事故再现分析软件, 其内基于多刚体力学的车、人多刚体模型的有效性已得到了一定程度的验证^[7-9], 该软件具有建模容易、模拟时间短以及模拟过程界面形象逼真, 分析结果易提取等特点^[9], 但目前关于其在车 - 人事故再现方面的研究比较少见。本文将以 Pc-Crash 为仿真平台, 充分利用可获得事故信息, 研究基于该软件的车 - 人事故再现分析方法, 最后将给出一案例演示该方法的步骤。

1 Pc-Crash 软件

Pc-Crash 为奥地利 DSD (Dr. Steffan Datentechnik GmbH) 公司开发的专用于事故再现分析的软件, 该软件包含两大部分: Pc-Rect, Pc-Crash, 前者可将现场拍摄所得图片转换成分析系统所需的 DXF 文件; 后者为事故再现分析系统, 其中包含有轨迹、拖车、多刚体模型

基金项目: 国家自然科学基金(50808181, 10972241); 广东省科技计划项目(2009B030803038, 2007B030102003); 广东省智能交通信息平台(2008B050100013)资助

收稿日期: 2009 - 10 - 16 修改稿收到日期: 2010 - 09 - 12

第一作者 邹铁方 男, 讲师, 1982 年生

通讯作者 余志 男, 教授, 1961 年生

及基于动量守恒的碰撞模型等,可实现对常见事故形态的模拟分析。

利用 Pc-Crash 实现车 - 人碰撞事故仿真分析时,将车辆视为刚体;行人模型则由多个刚体组成,不同刚体间通过铰链连接,每个刚体代表不同的部分如头,躯干等,其外形由一个椭球体定义,椭球参数以及刚体的质量、接触刚度、摩擦系数等都可单独指定^[6-8]。现有的 Pc-Crash(8.0 版)自带成人假人模型由 16 刚体和 15 铰链组成。

利用该软件实现事故再现分析时,可以充分利用事故中各种有效信息,相互佐证所得结论的合理性。一般可遵循如下步骤进行:① 事故现场重建;② 车、人模型建立;③ 仿真分析及结果;④ 仿真结果的验证;⑤ 仿真结果不确定度评估。下面将以一实际的事故案例为例,来演示如何利用 Pc-Crash 实现车 - 人事事故的再现分析。

2 事故介绍

2007 年某月某日上午在某国的一交叉路口,一行人(亚裔,女,20 岁)走到行驶的汽车前,被撞后被冲击力抛入合法停放路边的汽车底部,行人受到 AIS 2 等伤害。

事故车辆为 1998 年产马自达 E2000 面包车,事故发生前车辆状况良好,事故中车左前窗玻璃破碎。事故发生时,天气晴朗,能见度佳,路面平直干燥,行驶道路限速 60 km/h。据司机描述,事故发生前其未采取任何有效措施防止碰撞发生,其行驶速度约为 55 km/h,事故现场示意图见图 1。根据警察报告可知事故发生后行人最终停止位置为:停放在路边车辆的车底紧挨前轮处,且两脚从车底下伸出来。

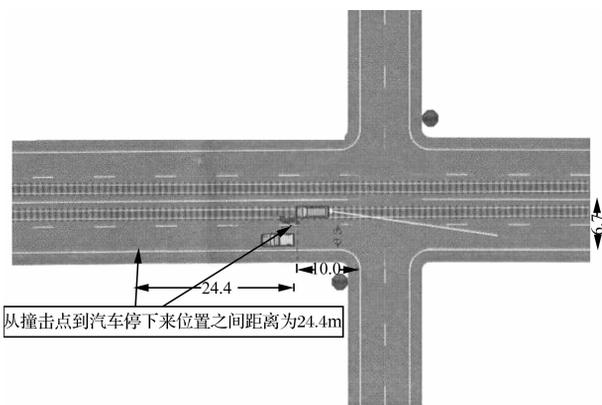


图 1 事故现场示意图
Fig. 1 Sketch of the accident

3 事故再现分析

事故再现分析的一项核心内容为事故车辆车速的鉴定,本文将利用 Pc-Crash 来研究碰撞发生时车辆的车速。

3.1 事故现场重建

这一步主要为根据事故现场信息及事故现场图或现场示意图,构建事故发生地点的二维或三维模型。该步骤可先通过输入事故现场图或示意图的图片,按比例缩放后,再在此基础上利用 Pc-Crash 内的三维道路生成模块实现。本文事故发生在平直公路上,仅需要事故现场示意图,无需生成三维道路。本案例中重建后的事故现场可参见图 2。事故现场重建后,事故现场各物间的关系可直接在 Pc-Crash 内测量得到,如事故车辆右侧离路边距离为 6.3 m,合法停放在路旁的车辆右侧离路边的距离为 2.4 m。

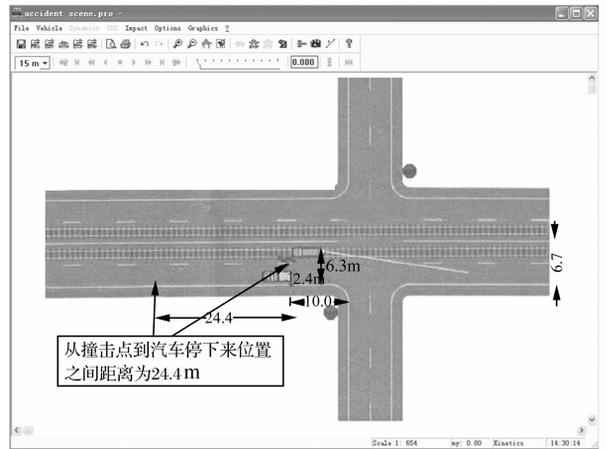


图 2 重建的事故现场
Fig. 2 The reconstruction accident scene

3.2 车、人模型建立

一般而言,通过 Pc-Crash 内的车辆数据库可以获得事故车辆的很多信息,如长宽高等,但车辆的外形尺寸则很难获取。而车辆信息中外形参数为非常敏感的参数^[3, 7, 8],故应该尽可能准确地获取图 1 中的各参数的值,特别是车头部分参数的值;这些参数的值一般可将肇事车辆的图片经由 Pc-Rect 软件处理后获得,或直接将肇事车辆的侧视图输入 Pc-Crash 软件内经适当缩放后测量获得,本案例中事故车辆外形轮廓参数见图 3,其他参数为软件内车辆 Mazda E2000 默认参数。

行人模型可以通过输入 Pc-Crash 内自带假人模型而获得。模型输入软件界面后,应修改其身高、体重等

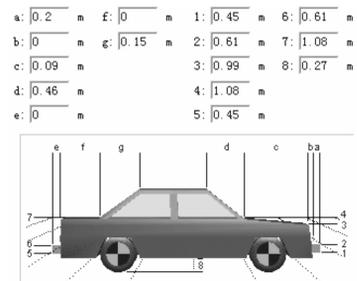


图 3 事故车辆轮廓参数
Fig. 3 Parameters of vehicle shape

参数值。本案例中,行人身高为 159 cm,体重 50 kg,其它默认。

3.3 仿真分析及结果

当前述 2 步骤均成功实现后,则可实现仿真分析。通过反复地调整人车初始相对位置,车辆的速度,行人行走速度、姿态以及人-车、人-路间摩擦系数等参数,以使得人-车碰撞接触位置与事故信息相吻合以及行人最终停止位置与事故现场停止位置尽可能一致。当吻合程度达到最好时,则认为所对应的各参数值为最优值。

通过反复仿真发现,当取车辆车速 55 km/h,行人行走速度 10 km/h,车-路间摩擦系数 0.8,车辆制动系协调时间 0.2 s,人-路间摩擦系数 0.6,人-车间摩擦系数 0.2 时,所得仿真信息与事故信息最吻合。图 4 与图 5 给出了仿真中碰撞发生后事故参与者位置等信息;图 6 至图 9 给出了仿真过程中,不同时刻人车相对位置;图 10 给出了行人最终停止位置,该图中车辆为合法停放在路边的车。图 11 中给出行人头部加速度曲线,图中黑竖线处 $t = 0.275$ s。

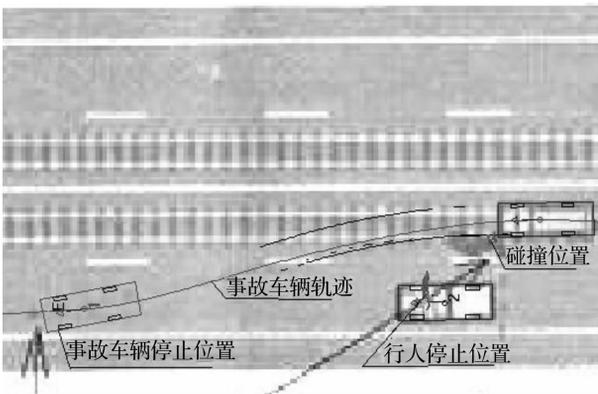


图 4 仿真中碰撞发生后事故参与者位置信息
Fig. 4 Positions of participator involved in the accident (2D)



图 5 仿真中碰撞发生后事故参与者位置信息(三维视图)
Fig. 5 Positions of participator involved in the accident (3D)

由图 4 可以看出,事故车辆最终停止位置与实际位置很接近(事故现场图中并未给出准确的事故车辆停止位置,但通过测量碰撞位置与停车位置车辆前左端点之间的距离为 24.4 m,与现场图中给出的一致);由图 7 可以发现,在碰撞发生后约 0.045 s 时刻,行人头部及躯干击中车辆左侧前车窗玻璃,这是导致车窗

玻璃破碎的原因;图 8 显示,在 0.275 s 时刻,行人头部与地面发生碰撞,使得行人头部受到 1 160.76 N 的冲击力作用,产生加速度 47.7 g(见图 11),此为行人头部在整个事故过程中受到的最大冲击力,意味着行人头部伤害主要来源于与地面的撞击;图 9 显示,在 0.630 s 时刻,行人左腿与地面撞击,这是导致行人左小腿伤害的主要原因(右腿骨折则主要由撞击造成);图 10 中行人最终停止位置与警察报告中描述的相符。由图 4 至 10 可知仿真能够反映实际事故情况。

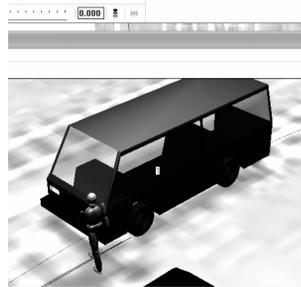


图 6 仿真 0 时刻人车相对位置
Fig. 6 The relative position of vehicle and pedestrian when $t = 0$ s in simulation

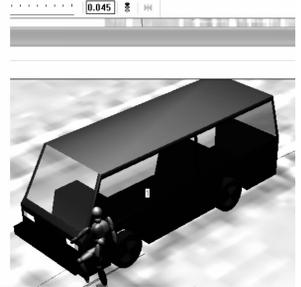


图 7 仿真 0.045 s 时刻人车相对位置
Fig. 7 The relative position of vehicle and pedestrian when $t = 0.045$ s in simulation

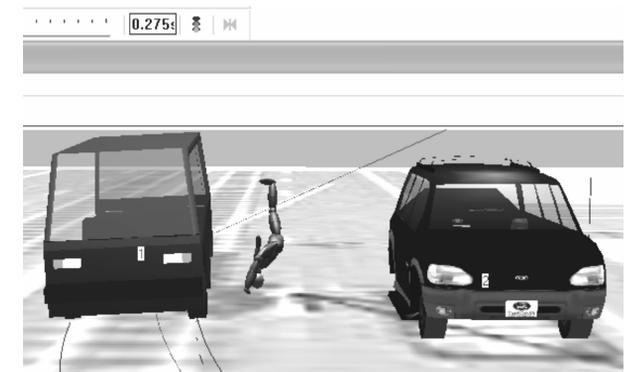


图 8 仿真 0.275 s 时刻人车相对位置
Fig. 8 The relative position of vehicle and pedestrian when $t = 0.275$ s in simulation



图 9 仿真 0.630 s 时刻人车相对位置
Fig. 9 The relative position of vehicle and pedestrian when $t = 0.630$ s in simulation



图 10 行人最终停止位置
Fig. 10 The rest position of the pedestrian

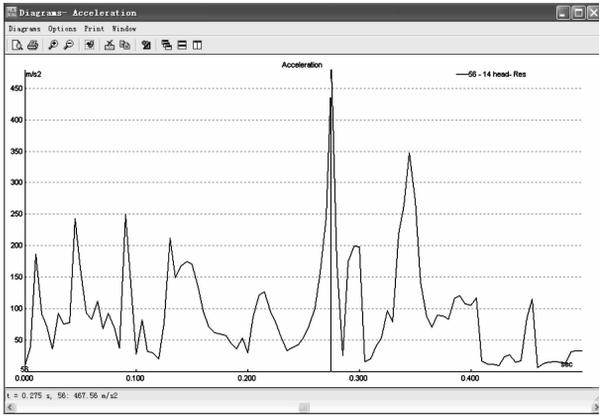


图 11 仿真中行人头部加速度曲线

Fig. 11 The Acceleration of the head of the pedestrian in simulation

3.4 仿真结果的验证

利用 Pc-Crash 实现事故再现仿真时,最大的优势在于可以充分利用事故现场的各种有效信息,验证所得结论的合理性,从而使得再现分析结果更为客观、更有说服力。在步骤 3.3 中,所利用的证据主要包括车-人碰撞接触位置以及车、人停止位置等信息,但行人损伤及车辆变形等信息并未能利用,而这些信息在事故再现分析中又很有价值^[1-2,4-5,10],基于多刚体的车-人碰撞数字化重构中,车身结构的变形特性不能很好地体现,但行人的碰撞响应则是可以获得的。获得行人碰撞响应后再结合行人损伤生物力学知识则可确定其损伤情况。然后将仿真所得损伤情况与行人法医学报告对比,则能验证前述步骤仿真所得结果的合理性。

在本案例中,行人受到 AIS 2 等伤害这一信息在步骤 3.3 中未得到利用,下面将根据这一信息和仿真结果以及损伤生物力学的知识来验证仿真结果的合理性。仿真分析中行人各部位的损伤及 AIS 评分情况参见表 1。

表 1 仿真分析中行人各部位的损伤及 AIS 评分情况

Tab. 1 The AIS and injury of each body of the pedestrian

部位	行人伤害标准	参考文献	仿真值	行人损伤推断	AIS 值
头部	HIC ≤ 1 000	[11]	HIC ₁₅ = 75.5	头部未受到严重伤害	0
胸部	3 ms 合成加速度值 ≤ 60 g	[11]	18.28 g	胸部未受到严重伤害	0
大腿	大腿骨折最大剪切力 6.3 kN	[1,12]	左股骨 3 228 N 右股骨 2 835 N	股骨未骨折	0
小腿	小腿骨折最大剪切力 4 kN	[1,12,13]	左胫骨 2 407 N 右胫骨 4 392 N	胫骨骨折	2
膝关节	2.1 kN ≤ 膝关节耐受限度 ≤ 3.1 kN	[12,14]	左膝 5 904 N 右膝 7 169 N	髌骨骨折	2

从表 1 中可以看到,行人的确受到的是 AIS 2 等伤害,与所能获知的信息一致。到此,基本能确定事故发

生时,事故车辆车速就为司机所述的 55 km/h 左右。

3.5 仿真结果不确定度评估

事故再现中一项重要的内容就是再现结果的不确定性问题,在知道事故现场参数所服从概率分布条件下获得再现结果的分布规律或在仅仅知道事故现场参数取值区间条件下获取再现结果的取值区间,这样不仅将使得再现结果更为客观,且能为事故鉴定提供更多的证据。仿真分析中模型的显式表达式一般未知,故需要先借助响应曲面思想获得一个近似的表达式,再结合这一近似的表达式与蒙特卡罗法分析仿真结果的不确定性。

本案例中,估计制动系协调时间 $t \in [0.1, 0.3]$ s,服从均值为 0.2 的正态分布;车辆平均制动减速度 $a \in [4, 7]$ m/s²,服从均值为 5.5 的正态分布;而事故发生后车辆按照一定轨迹滑行距离 $s \in [23.4, 25.4]$ m,服从均值为 24.4 m 的正态分布。现需根据 s, t, a 这三个参数来确定事故车辆车速 v 的不确定度。将 s 视为响应, v, a, t 视为输入,并估计 $v \in [40, 70]$ km/h,借助响应曲面思想,利用均匀设计方法生成试验样本集。试验表及试验结果参见表 2。

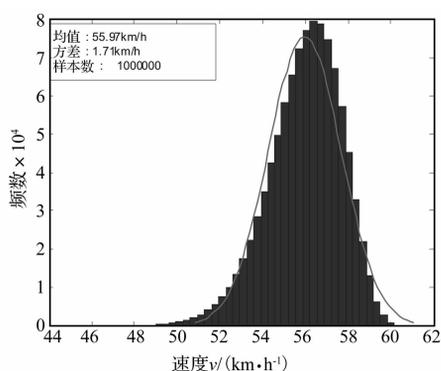
通过回归分析可得 $v = -17.2 + 11a - 6.47t + 1.81s - 0.703a^2 - 0.0147s^2$,由方差分析可知回归关系显著,又相关系数和剩余标准差分别为 0.999 和 0.396,表明模型和数据拟合得很好。然后利用该近似表达式及蒙特卡罗法(样本容量为 10⁶),可得 v 的分布图,见图 12。

表 2 试验表及试验结果

Tab. 2 Test scheme and test results

试验号	$v / (\text{km} \cdot \text{h}^{-1})$	$a / (\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	t / s	s / m
1	47.50	7.000	0.225	14.54
2	70.00	5.125	0.250	42.48
3	62.50	4.000	0.175	38.89
4	43.75	4.375	0.275	17.81
5	40.00	5.875	0.150	10.79
6	66.25	6.625	0.125	30.80
7	51.25	4.750	0.100	21.64
8	55.00	5.500	0.200	23.25
9	58.75	6.250	0.300	25.50

由图 12 可以看出,速度 v 服从均值为 55.97 km/h,方差为 1.71 km/h 的正态分布,其值分布在区间 [50.8, 61.1] km/h 内的概率为 99.7%,分布在区间 [52.6, 59.4] km/h 内的概率为 95.4%,分布在区间 [54.26, 57.68] km/h 内的概率为 65.3%。此处给出的区间信息比前一部分给出的“55 km/h 左右”这一信息更客观、更有说服力,亦更能辅助进行事故责任认定,可为事故鉴定提供了更多有效的信息。

图12 事故车速 v 分布Fig. 12 The distribution of the vehicle velocity v

4 结论

本文提出以 Pc-Crash 为仿真平台,充分利用事故现场信息对事故进行仿真,并评估所得再现结果不确定度的车-人事故再现方法。通过对文中实际事故案例再现分析表明,按照本文方法的步骤,可得到满足所有事故信息的再现分析结果,故使所得结果更客观,更有说服力;且能获知再现结果的分布规律,能得到事故再现结果取值在某一区间内的概率,这可为事故鉴定提供了更多有效的信息。

参考文献

- [1] 赵志杰,金先龙,张晓云,等. 面向人体损伤的人车碰撞事故再现[J]. 振动与冲击, 2008, 27(5): 95-98.
- [2] 金先龙,张晓云. 交通事故数字化重构理论与实践[M]. 北京:人民交通出版社, 2007.
- [3] 林庆峰,许洪国. 汽车行人碰撞抛射仿真模型[J]. 汽车工程, 2007, 29(4): 296-299.

(上接第 214 页)

参考文献

- [4] 黄龙生. 海域地震桥梁震害调查报告[R]. No 5,北京:中国科学院工程力学研究所,1975.
- [5] Abdelkareem K H, Chida A. Effects of Vertical Motion of Earthquake on Failure Mode and Ductility of RC Bridge Piers [C]. Proceedings of the 12th World Conference on Earthquake Engineering, Auckland; pringer, 2000, 1123-1157.
- [6] 刘庆华. 钢筋混凝土桥墩抗震设计中滞回模型与损伤模型的实验与理论研究[D]. 北京:北方交通大学土木建筑系,1994.
- [7] 阎贵平,项海帆. 钢筋混凝土桥墩弹塑性动力特性的实验研究[J]. 同济大学学报, 1991, 19(增刊): 43-56.
- [8] 刘庆华,阎贵平,陈英俊. 低配筋混凝土桥墩抗震性能的实验研究[J]. 北方交通大学学报. 1996, 20(5): 517-521.
- [9] 川岛一彦,长谷川金二,小山达彦,等. RC 桥脚的动的耐力に关する实验研究-(その1)昭和 56 年度~昭和 58 年度の检讨结果[R]. No 2232, 东京:土木研究所, 1985.
- [10] 川岛一彦,长谷川金二,等. RC 桥脚的动的耐力に关する实验研究(その2)断面形状、荷重、荷载方向、ちせん铁筋及びせん断补强铁筋的影响[R]. No 2279, 东京:土木研究所, 1986.
- [11] Öztürk H, Ayvaz Y. Comparative study of behavior of

- [4] Zhang Xiao-yun, Jin Xian-long, Qi Wen-guo, et al. Vehicle crash accident reconstruction based on the analysis 3D deformation of the auto-body [J]. Advanced in Engineering Software, 2007, Doi: 10.1016/advengsoft. 2007.
- [5] 杨群印,金先龙,张晓云,等. 面向人体损伤的载货车-摩托车事故再现研究[J]. 振动与冲击, 2008, 26(5): 77-80.
- [6] Hermann Steffan. Pc-Crash technical manual version 7.3 [M]. Linz, Austrian: Dr Steffan Datentechnik GmbH, 2006.
- [7] Moser A, Steffan H, et al. The pedestrian model in Pc-Crash-The introduction of a multi body system and its validation [C]. SAE paper, 1999-01-0445: 794-802.
- [8] Moser A, Steffan H, et al. Validation of the Pc-Crash pedestrian model [C]. SAE Paper, 2000-01-0847: 1336-1339.
- [9] 王国林,鲁 砚. 人车碰撞事故仿真与行人保护研究[J]. 汽车工程, 2009, 31(1): 14-17.
- [10] 郭 磊,金先龙,申 杰,等. 人车碰撞事故的行人伤害研究[J]. 上海交通大学学报, 2007, 41(2): 262-267.
- [11] GB/T 11551-89 汽车乘员碰撞保护[S].
- [12] Yang Ji-kuang. Review of Injury Biomechanics in Car-Pedestrian Collisions [C]. In: Report to European Passive Safety Network. Goteborg, 2002: 1-19.
- [13] Nyquist G W, Cheng R, El-Bohy A A R, et al. Tibia Bending: Strength and Response [C]. Proc. of 29th STAPP Car Crash Conference. SAE paper No. 851728, P167, Warrendale, PA, USA, 1985: 99-112.
- [14] Kajzer J, Matsui Y, Ishikawa H, et al. Shearing and Bending effects at the Knee Joint at Lower Speed Lateral Loading [C]. SAE Paper 99010712, 1999: 415-432.

- reinforced concrete beams strengthened and repaired-strengthened by using V connecting bars and U connecting stirrups [J]. Construction and Building Materials, 2002, 16(6): 321-329.
- [12] Mohamed Ali M S, Oehlers D J, Seracino R. Vertical shear interaction model between external FRP transverse plates and internal steel stirrups [J]. Engineering Structures, 2006, 28(3): 381-389.
- [13] Mangat P S, Motamedi A M. Influence of steel fibre and stirrup reinforcement on the properties of concrete in compression members [J]. International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 1985, 7(3): 183-192.
- [14] 孙 卓,李建中,闫贵平,等. 钢筋混凝土单柱式桥墩抗震性能试验研究[J]. 同济大学学报, 2006, 34(2): 160-164.
- [15] 沈在康. 混凝土结构试验方法新标准应用讲评[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1994: 20-106.
- [16] 向 上. 日本铁路桥梁抗震设计中延性率的评价方法[C]. 成都:西南交通大学出版社, 2006: 294-301.
- [17] 叶爱君. 桥梁抗震[M]. 北京:人民交通出版社, 2002: 32-106.