

桥梁砼护栏直立式接高改造设计与碰撞分析^{*}赵庆云¹, 吴军鹏¹, 刘康¹, 孟涛¹, 卜倩森²

(1.山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031; 2.交通运输部公路科学研究院, 北京 100088)

摘要: 随着新规范的颁布和实施, 很多在用桥梁护栏防护等级严重不足。为提高在用桥梁护栏的防护能力, 并考虑护栏改造的施工方便性和经济性, 文中提出一种基于原护栏保留利用的直立式接高改造方案, 通过理论分析对新老护栏连接、护栏构件强度、桥面板锚固性能进行验算, 并通过加强铺装层横向钢筋解决大翼缘桥面板锚固不足的问题; 建立有限元仿真模型, 进一步优化改造方案, 并通过实车碰撞试验对护栏防护性能进行验证, 结果表明, 改造后护栏的阻挡功能、缓冲功能、导向功能等安全性能指标均满足 JTG B05—01—2013《公路护栏安全性能评价标准》的要求, 防护等级达到 SS 级。

关键词: 交通工程; 桥梁护栏; 护栏改造; 碰撞试验; 防护等级; 锚固性能

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 1671—2668(2020)01—0046—06

近年来中国交通事业突飞猛进, 车辆行驶速度及重车比例不断提高, 对桥梁护栏的防护能力要求越来越高。JTG D81—2017《公路交通安全设施设计规范》对高速公路桥梁特别是跨越公路、铁路或城市饮用水源一级保护区等路段的桥梁护栏提出了更高的防护要求。早期(特别是 2006 年以前)建设的部分桥梁, 由于建设时期执行的规范标准对桥梁护栏的设防等级偏低, 难以满足新交通环境的需求; 同时公路路面加铺、罩面或提升改造, 导致部分桥梁护栏高度不足, 存在较大安全隐患。为保证行车安全, 对这部分桥梁护栏的提升改造正逐步开展。

相关文献及工程实例表明, 利用原砼护栏接高钢梁柱改造为组合式护栏的方案可行且施工方便, 但存在造价高、养护困难的问题; 拆除新建高等级护栏改造彻底, 但施工安全性及工程经济性不好。该文通过工程调研和理论计算, 设计一种利用原砼护栏直立式接高的护栏改造方案, 依托实际工程对大翼缘桥面板的护栏锚固进行加强设计, 并通过仿真分析及实车碰撞试验对改造方案进行优化和验证。

1 改造方案设计

按照安全可靠、普适性强、经济合理、施工方便的原则, 确定图 1 所示护栏改造设计思路。

桥梁护栏一般采用砼护栏或组合式护栏。对早期修建的桥梁护栏形式进行统计, 发现大量护栏采

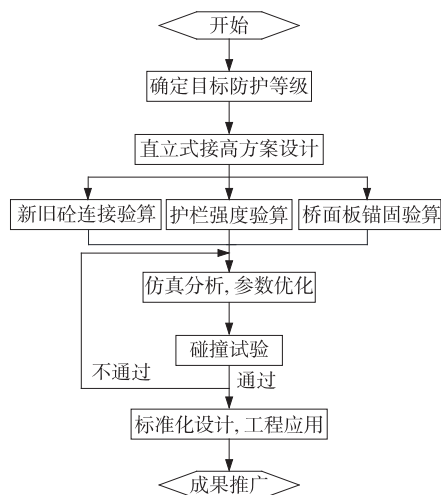


图 1 护栏接高改造设计思路

用基本型(NJ 型)迎撞面的组合式护栏(见图 2), 护

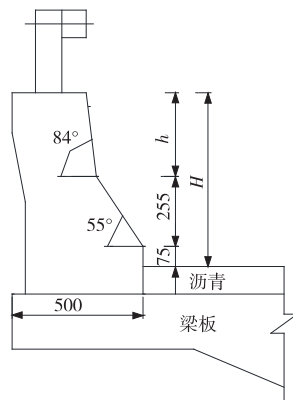


图 2 基本型迎撞面的组合式护栏构造图(单位:mm)

^{*} 基金项目: 山东省交通运输厅科技项目(KJ—2016—SDSJTT—04X)

表 1 典型护栏尺寸

| 护栏类型 | mm | |
|----------------|-----|-----|
| | h | H |
| 基本型组合式护栏或砼墙式护栏 | 305 | 635 |
| | 355 | 685 |
| | 480 | 810 |

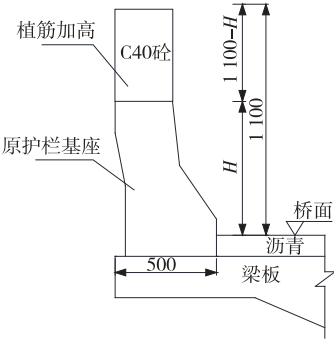


图 3 护栏直立式接高改造方案(单位:mm)

栏迎撞面变坡点位置及迎撞面坡线角度均相同,仅变坡点至砼护栏顶面高度 h 不同,主要分为三类(见表 1)。保留利用原砼护栏部分,充分考虑改造方案的通用性,控制护栏总高度 110 cm,拟定图 3 所示护栏直立式接高改造方案。

2 理论计算

桥梁护栏防护等级提升,相应的碰撞荷载增大,新规范对碰撞荷载分布长度进行了调整,选择最不利护栏高度 $H=635\text{ mm}$ 的情况进行验算。按照 JTG/T D81—2017《公路交通安全设施设计细则》中的计算方法,考虑自重、碰撞荷载、声屏障风荷载的组合效应,对新老砼连接面、砼护栏构件及锚固桥面板进行强度验算。

2.1 最大碰撞力与设计碰撞力

车辆横向碰撞荷载与车辆速度、汽车质量、碰撞角度有关,最大横向碰撞荷载为:

$$F_{\text{碰}} = \frac{\pi}{2} \times \frac{m(v \sin \theta)^2}{2000[C \sin \theta - b(1 - \cos \theta) + Z]}$$

式中: $F_{\text{碰}}$ 为作用在护栏上的最大横向碰撞力(kN); m 为车辆质量(kg); v 为车辆碰撞速度(m/s); θ 为车辆碰撞角度($^{\circ}$); C 为车辆重心与前保险杠间的距离(m); b 为车辆宽度(m); Z 为护栏的横向变形(m),对于刚性砼护栏, $Z=0$ 。

分别对 SS 级对应的小型客车、大型客车、大型货车进行计算,结果见表 2。偏安全地取最大值即规范中碰撞荷载设计标准值 520 kN 进行计算,作用点距护栏顶面以下 5 cm。

表 2 最大横向碰撞力计算

| 碰撞 车型 | m/t | $v/$ ($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | $\theta/$ ($^{\circ}$) | $C/$ m | $b/$ m | $Z/$ m | $F_{\text{碰}}/$ kN |
|--------------------|-------|---------------------------------------------|-----------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------------------|
| 小型客车 | 1.5 | 100 | 20 | 2.17 | 1.67 | 0 | 166.1 |
| 大型客车 | 18.0 | 80 | 20 | 5.75 | 2.52 | 0 | 449.1 |
| 大型货车 | 33.0 | 60 | 20 | 7.85 | 2.49 | 0 | 329.6 |
| 《公路交通安全设施设计规范》中标准值 | | | | | | | 520.0 |

2.2 风荷载计算

声屏障高度 2 m,锚固于砼护栏顶面,迎风面距离路面高度 3.1 m,横向风荷载作用点位于护栏顶以上 45 cm 处(见图 4)。按照 JTG/T D60—01《公路桥梁抗风设计规范》中的计算方法,护栏单位长度的横风向静风荷载为:

$$F_{\text{风}} = \frac{1}{2} \rho v_{\text{g}}^2 C_{\text{H}} H = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 31.75^2 \times 1.77 \times 3.1 = 3.46 \text{ kN/m}$$

其中: ρ 为空气密度,取 1.25 kg/m^3 ; v_{g} 为静阵风风速,取 31.75 m/s ; C_{H} 为阻力系数,其值为 1.77。

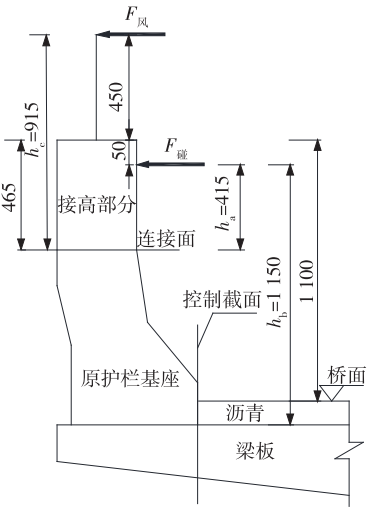


图 4 护栏受力简图(单位:mm)

2.3 新旧砼连接面强度验算

取原砼护栏高度最小 635 mm 的最不利情况进行计算,护栏受力见图 4。横向碰撞荷载自砼顶面沿 45° 向下传递,新旧砼连接面处的荷载有效分布宽度为:

$$L_a = L_t + 2h_a = 2.4 + 2 \times 0.415 = 3.23 \text{ m}$$

式中: L_t 为车辆碰撞荷载的分布长度,为 2.4 m; h_a 为碰撞荷载作用点至新旧砼连接面的高度,为 0.415 m。

作用偶然组合效应值为:

$$S_{\text{ad}} = F_{\text{碰}} h_a + \varphi_q F_{\text{风}} L_a h_c = 520 \times 0.415 + 0.75 \times 3.46 \times 3.23 \times 0.915 = 223.47 \text{ kN} \cdot \text{m}$$

式中: φ_q 为风荷载的准永久值系数, 为 0.75; h_c 为风荷载作用点至新旧砼连接面的高度, 为 0.915 m。

护栏接高改造时按纵桥向间距 20 cm 植入 $\phi 16$ 钢筋进行锚固连接(见图 5), 连接截面抗弯承载力见式(1), 满足要求。

$$M_u = 264 \text{ kN} \cdot \text{m} > S_{ad} = 223.47 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (1)$$

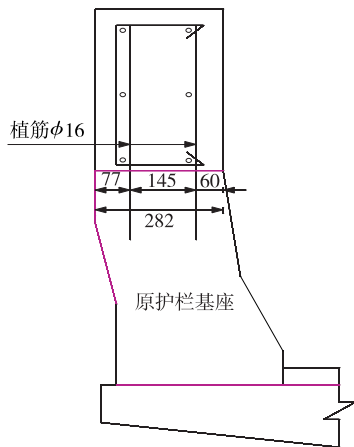


图 5 新旧砼连接面植筋布置(单位:mm)

2.4 桥面板锚固强度验算及加强措施

对大量实际工程图纸的调研发现, T 形梁或工字形组合梁翼缘板厚度小、横向配筋弱, 选择最不利的桥面板对护栏根部控制截面(图 4 所示控制截面)进行验算, 典型桥面板构造及钢筋布置见图 6。护栏根部荷载分布长度为:

$$L_a = L_t + 2h_b = 2.4 + 2 \times 1.15 = 4.7 \text{ m}$$

式中: h_b 为碰撞荷载作用点至桥面板顶高度, 为 1.15 m(考虑 10 cm 沥青铺装厚度)。

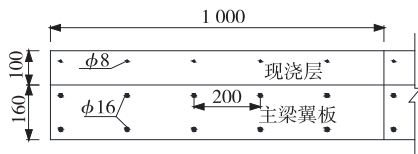


图 6 典型桥面板构造及钢筋布置(单位:mm)

控制截面处作用偶尔组合效应值见式(2), 桥面板抗弯承载力不满足护栏锚固要求。

$$S_{ad} = 618.1 \text{ kN} \cdot \text{m} > M_u = 165 \text{ kN} \cdot \text{m} \quad (2)$$

结合工程实际情况, 为尽量减少对交通的影响, 采用局部铺装增强方案(见图 7): 通过重做护栏侧 2 m 范围内桥面铺装层, 增设现浇层横向钢筋进行加强, 加强钢筋采用 $\phi 16$ 钢筋, 纵向间距 10 cm, 有效植入护栏砼。对于沥青铺装层大于 7 cm 的桥梁, 也可减小 2 m 范围内沥青铺装, 以加大砼现浇层厚度, 增强桥面板锚固承载力。对上述加强方案进行

承载力计算, 结果见表 3。

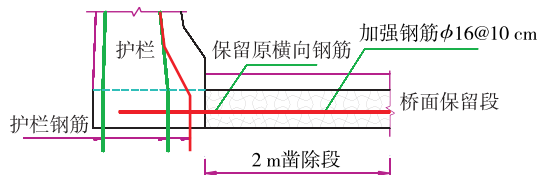


图 7 现浇层加强设计配筋布置

表 3 桥面板锚固加强验算

| 方案 | 截面高度/cm | 钢筋配置 | 荷载组合/ (kN·m) | 承载力/ (kN·m) | 是否满足 |
|-------|---------|-------------------------|--------------|-------------|------|
| 现状 | 26 | $\phi 8@20 \text{ cm}$ | 618.12 | 165 | 否 |
| 重做现浇层 | 26 | $\phi 16@10 \text{ cm}$ | 618.12 | 642 | 是 |

2.5 砼构件强度验算

接高改造后的护栏构造及钢筋由两部分组成, 一部分为图 8 所示原护栏, 另一部分为图 5 所示接高部分。基于屈服线分析和强度设计理论对护栏承载力采用极限荷载分析方法进行计算。在荷载作用下, 首先护栏底部产生微裂缝, 随着荷载的增大, 裂缝向自由边延伸, 最终护栏可能产生图 9 所示两种破坏模式。按照 JTG/T D81—2017《公路交通安全设施设计细则》的相关规定, 对标准段护栏及护栏端部分别按照两种破坏模式进行横向抗力计算。

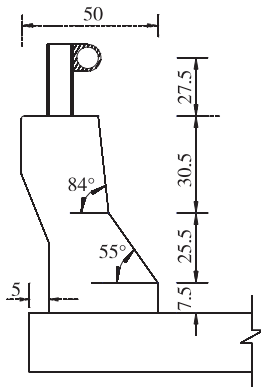


图 8 现状 PL3 型护栏钢筋布置(单位:cm)

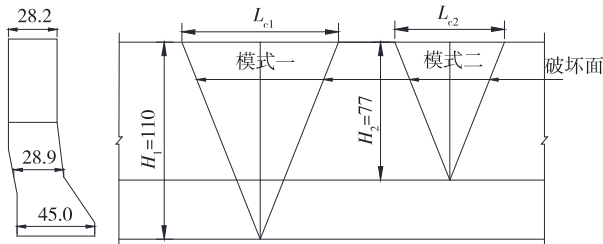


图 9 护栏的两种破坏模式(单位:cm)

碰撞发生在护栏标准段时, 护栏横向抗力按下式计算:

$$R_w = \left(\frac{2}{2L_c - L_t} \right) \left(8M_b + 8M_w + \frac{M_c L_c^2}{H} \right)$$

式中: R_w 为护栏横向抗力(kN); L_c 为屈服线破坏模式的临界长度(m),按式(3)计算; L_t 为车辆碰撞荷载的分布长度(m),对于 SS 级护栏, $L_t = 2.4$ m; M_b 为护栏顶部除 M_w 外的横梁附加弯曲承载力矩(kN·m),该护栏无横梁, $M_b = 0$; M_w 为护栏关于竖向轴的弯曲承载力矩(kN·m); M_c 为护栏关于桥梁纵轴的弯曲承载力矩(kN·m); H 为护栏有效高度(m)。

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2} \right)^2 + \frac{8H(M_b + M_w)}{M_c}} \quad (3)$$

碰撞发生在护栏端部或伸缩缝处时,护栏横向抗力按下式计算:

$$R_w = \left(\frac{2}{2L_c - L_t} \right) \left(M_b + M_w + \frac{M_c L_c^2}{H} \right)$$

式中: L_c 按式(4)计算。

$$L_c = \frac{L_t}{2} + \sqrt{\left(\frac{L_t}{2} \right)^2 + \frac{H(M_b + M_w)}{M_c}} \quad (4)$$

护栏横向抗力计算结果见表 4。由表 4 可知:破坏模式一旦碰撞发生在护栏端部时抗力最小,为 528.3 kN。

作用于砼护栏顶部的横向作用偶尔组合效应见式(5),满足要求。

表 4 护栏横向抗力计算结果

| 破坏模式 | 破坏位置 | $M_w / (\text{kN} \cdot \text{m})$ | $M_c / (\text{kN} \cdot \text{m})$ | $M_b / (\text{kN} \cdot \text{m})$ | H / m | L_c / m | R_w / kN |
|-------|-------|------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|----------------|------------------|-------------------|
| 破坏模式一 | 护栏标准段 | 85.1 | 116.5 | 0 | 1.20 | 4.11 | 797.3 |
| | 护栏端部 | 85.1 | 116.5 | 0 | 1.20 | 2.72 | 528.3 |
| 破坏模式二 | 护栏标准段 | 45.4 | 83.9 | 0 | 0.77 | 3.39 | 737.4 |
| | 护栏端部 | 45.4 | 83.9 | 0 | 0.77 | 2.56 | 558.2 |

$$S_{ad} = F_{\text{碰}} + \varphi_q F_{\text{风}} \quad L_c = 520 + 0.75 \times 3.46 \times 2.72 = 527.0 \text{ kN} < R_w = 528.3 \text{ kN} \quad (5)$$

3 计算机仿真分析

3.1 计算模型

鉴于护栏真实受力的复杂性及不确定性,同时考虑尽量保证实车碰撞试验的一次通过率,通过计算机仿真分析对改造后护栏进行计算验证及参数优化。按照依托工程设计图纸,采用标准砼、钢筋参数建立护栏三维有限元模型(见图 10),分别采用标准试验车辆小型客车、大型客车、大型货车进行仿真碰撞模拟计算。

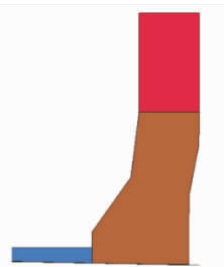


图 10 直立式接高护栏仿真模型

3.2 仿真分析结果

如图 11 所示,小型客车碰撞护栏后,未发生穿

越、翻越和骑跨护栏情况,尽管车辆尾部跃起高度较大,但最终正常导出且行驶姿态正常,未发生翻车现象。车辆碰撞过程中,护栏砼产生少量剥落,但护栏构件及其脱离件并未侵入车辆乘员舱。如图 12 所

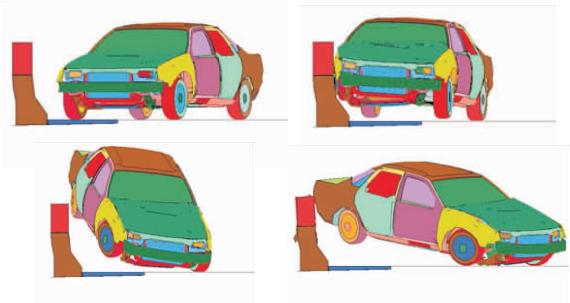


图 11 小型客车模拟碰撞过程

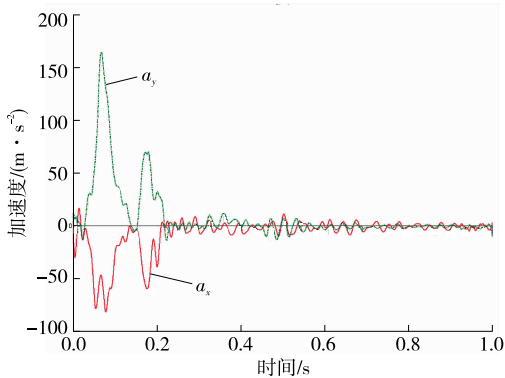


图 12 小型客车重心加速度曲线

示,小型客车重心加速度纵向和横向分量的最大值分别为 $a_x = -82 \text{ m/s}^2$ 、 $a_y = 166.4 \text{ m/s}^2$,均小于 200 m/s^2 ,满足评价标准要求。根据重心加速度数据,计算得乘员碰撞速度纵向和横向分量分别为 $v_x = 4.1 \text{ m/s}$ 、 $v_y = -6.6 \text{ m/s}$,绝对值均小于 12 m/s ,符合标准要求。

如图 13、图 14 所示,大型客车、大型货车碰撞护栏后,车辆均未发生穿越、翻越和骑跨护栏情况,车辆正常导出且行驶姿态正常。车辆碰撞过程中,护栏砦发生一定程度破坏,但脱离物并未侵入车辆内部,满足评价标准要求。

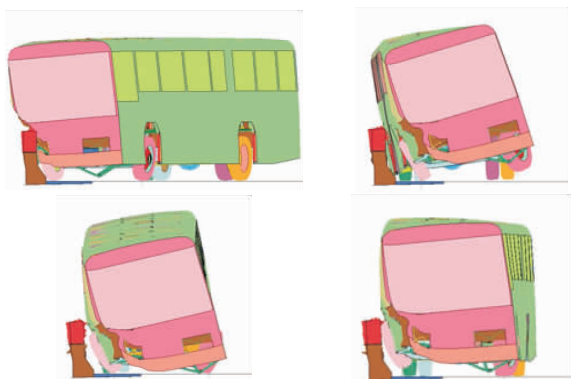


图 13 大型客车模拟碰撞过程

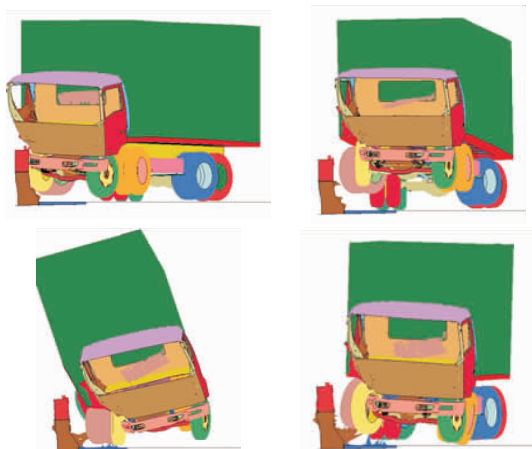


图 14 大型货车模拟碰撞过程

4 碰撞试验

按 1:1 的比例浇筑护栏试验段,长度 40 m(见图 15)。按照 JTG B05—01—2013《公路护栏安全性能评价标准》中 SS 级护栏碰撞试验条件及方法的要求,分别采用小型客车、大型客车、大型货车进行实车碰撞试验,碰撞试验等级为 SS 级,试验条件见表 5。



图 15 护栏试验段

表 5 实车碰撞试验条件

| 车辆类型 | 车辆重量/t | 车辆速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$) | 碰撞角度/($^\circ$) | 碰撞能量/kJ |
|------|--------|------------------------------------------|-------------------|---------|
| 小型客车 | 1.43 | 100.40 | 20 | 520 |
| 大型客车 | 18.02 | 82.32 | 20 | 520 |
| 大型货车 | 33.08 | 60.58 | 20 | 520 |

如图 16~18 所示,小型客车碰撞护栏时,护栏基本未发生损坏,车辆顺利导出;大型客车碰撞护栏时,护栏出现轻微斜向裂缝;大型货车碰撞护栏时,碰撞区域上部砦护栏出现可修复程度的损坏。试验过程中,3 种车辆均未穿越、翻越和骑跨护栏,最终正常导出,行驶姿态正常,没有发生翻车现象。改造后护栏的阻挡功能、导向功能、缓冲功能指标均符合《公路护栏安全性能评价标准》的要求,安全性能满足 SS 级防护等级要求。



图 16 小型客车碰撞试验后车辆及护栏情况



图 17 大型客车碰撞试验后车辆及护栏情况



图 18 大型货车碰撞试验后车辆及护栏情况

5 结语

该文根据理论计算,结合以往护栏改造经验提出直立式接高改造护栏方案。该方案保留利用原砼护栏部分,顶面植筋,以直墙式加高砼护栏,控制改造护栏总高度为 110 cm。同时通过桥面板锚固分析,提出弱翼缘桥面板的加强方案以满足护栏锚固要求。通过计算机仿真模拟及实车碰撞试验对护栏安全性能进行优化和验证,结果表明改造后护栏防护性能达到 SS 级。

桥梁砼护栏直立式接高改造方案已在多座桥梁护栏提升工程中得到应用,实施效果表明该方案可最大限度保留利用原护栏,且施工方便、造价低,具有较高推广价值。

参考文献:

- [1] JTG D81—2017,公路交通安全设施设计规范[S].
- [2] 邵永刚.组合式桥梁护栏防撞性能仿真与试验[J].交通运输工程学报,2010,10(1).
- [3] 侯德藻,袁玉波,杨曼娟,等.在用桥梁护栏安全性能改进方法研究[J].公路交通科技,2010,27(5).
- [4] 岳锐强,李文,张翔,等.新型四级多功能型护栏实车足

尺碰撞试验研究[J].公路,2017(11).

- [5] JTG/T D81—2017,公路交通安全设施设计细则[S].
- [6] JTG/T D60—01,公路桥梁抗风设计规范[S].
- [7] 石红星,白书锋,吕伟民.桥梁混凝土护栏设计的研究[J].公路交通科技,2002,19(6).
- [8] JTG B05—01—2013,公路护栏安全性能评价标准[S].
- [9] 贾宁,闫书明,马亮,等.组合式消能减速护栏实车碰撞试验研究[J].振动与冲击,2013,32(13).
- [10] 杨佩佩,刘乙橙,黄兰华.路侧护栏优化与改善研究[J].公路与汽运,2008(1).
- [11] 朱超,邵毅明,周莎,等.新形势下道路安全护栏发展现状与趋势研究[J].公路与汽运,2011(4).
- [12] 闫书明.城市桥梁新型桥侧混凝土护栏的碰撞分析[J].武汉科技大学学报,2014,37(3).
- [13] 高昆.路侧新型混凝土护栏实车足尺碰撞试验研究[J].公路,2019(1).
- [14] 黄小清,张秀丽,汤立群.三跨与单跨护栏系统的抗冲击性能比较[J].华南理工大学学报:自然科学版,2005,33(10).
- [15] 王鹏鹏.一种改造的新泽西型桥梁混凝土护栏试验研究[J].北方交通,2015(3).

收稿日期:2019—06—18

(上接第 39 页)

- nt, training and experience in Kumasi, Ghana[J]. Safety Science, 2015, 75.
- [10] Tseng C M. Speeding violations related to a driver's social-economic demographics and the most frequent driving purpose in Taiwan's male population[J]. Safety Science, 2013, 57.
- [11] Zhang G G, Yau Kelvin K W, Gong X P. Traffic violations in Guangdong Province of China: Speeding and drunk driving[J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 64.
- [12] Sagberg F, Bjørnskau T. Hazard perception and driving experience among novice drivers[J]. Accident Analysis and Prevention, 2006, 38(2).
- [13] Mohammed N P. A study of the psychological factors that influence the rule violation behaviour of drivers [A]. 25th ICTCT Workshop in Hasselt, Belgium [C]. 2012.
- [14] Alver Y, Demirel M C, Mutlu M. M. Interaction between socio-demographic characteristics: Traffic rule violations and traffic crash history for young drivers [J]. Accident Analysis and Prevention, 2014, 72.

- [15] Elias W. Who are the traffic offenders among ethnic groups and why [J]. Accident Analysis and Prevention, 2016, 91.
- [16] Vardak S, Yannis G. Investigating the self-reported behavior of drivers and their attitudes to traffic violations [J]. Journal of Safety Research, 2013, 46.
- [17] 廖福挺. 解释概率模型: Logit, Probit 以及其他广义线性模型 [M]. 上海: 格致出版社, 2015.
- [18] 张文彤, 董伟. 统计分析高级教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [19] 秦鸣, 宁建标, 邓明君. 系统聚类法在机动车司机违法驾驶行为中的应用 [J]. 公路与汽运, 2017(4).
- [20] 李平凡. 驾驶行为表征指标及分析方法研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2010.
- [21] 孙超, 严治, 邵源. 深圳市机动车驾驶员驾驶行为评价分析研究 [A]. 创新驱动与智慧发展: 2018 年中国城市交通规划年会论文集 [C]. 2018.
- [22] 沈碧莹, 瞿炜娜, 孙向红, 等. 中国驾驶员亲社会驾驶行为与人格的关系研究 [A]. 第二十届全国心理学学术会议: 心理学与国民心理健康摘要集 [C]. 2017.

收稿日期:2019—04—19