

波形梁护栏与组合式桥梁护栏免翼墙过渡研究

姜广伦¹,尚钟平^{2*},张银江³,吴俊宏²,李振⁴,钱俊³

(1.山东高速云南发展有限公司,云南昆明 650000;2.北京深华科交通工程有限公司,北京市 100071;3.昆明新机场高速公路建设发展有限公司,云南昆明 650000;4.山东省高速养护集团有限公司,山东济南 250000)

摘要:为解决在役公路护栏升级改造中波形梁护栏与组合式桥梁护栏过渡问题,该文提出一种施工简单、高效的SB级免翼墙过渡段。采用计算机仿真技术,对免翼墙过渡段的刚度过渡、高度过渡、横断面过渡进行研究。通过优化立柱间距、立柱截面尺寸,实现护栏刚度过渡。通过对比不同高度差下,车辆与护栏的接触面积及导出情况,初步确定当护栏高度差小于15 cm时,车辆能够被安全导出。在此基础上,对免翼墙过渡段具体方案进行碰撞仿真分析,并通过实车碰撞试验进一步验证其防护性能。试验结果表明:该结构能够达到标准规定的SB级防护能力。

关键词:护栏;过渡;免翼墙;计算机仿真;刚度过渡;高度过渡;实车碰撞

中图分类号:U491.59

文献标志码:A

Research on Wing-Wall-Free Transition between W-Beam Guardrail and Combined Bridge Guardrail

JIANG Guanglun¹, SHANG Zhongping^{2*}, ZHANG Yinjiang³, WU Junhong², LI Zhen⁴, QIAN Jun³

(1. Shandong Hi-Speed Yunnan Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China; 2. Beijing Shenhuake Traffic Engineering Co., Ltd., Beijing 100071, China; 3. Kunming New Airport Expressway Construction and Development Co., Ltd., Kunming, Yunnan 650000, China; 4. Shandong Hi-Speed Maintenance Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250000, China)

Abstract: To address the transition problem between the W-beam guardrail and the combined bridge guardrail during the upgrading and reconstruction of in-service highway guardrails, an SB-level wing-wall-free transition section with simple construction and high efficiency was proposed. Computer simulation technology was adopted to study the stiffness transition, height transition, and cross-section transition of the wing-wall-free transition section. The guardrail stiffness transition was achieved by optimizing the column spacing and column cross-sectional dimensions. By comparing the contact area between the vehicle and the guardrail and the vehicle redirection situation under different height differences, it was preliminarily determined that the vehicle can be safely redirected when the height difference of the guardrail is less than 15 cm. On this basis, a collision simulation analysis was conducted on the specific scheme of the wing-wall-free transition section, and its protection performance was further verified through a real vehicle collision test. The test results indicate that the structure can achieve the SB-level protection capacity stipulated by the standard.

Keywords: guardrail; transition; wing-wall-free transition; computer simulation; stiffness transition; height transition; real vehicle collision

0 引言

公路护栏由护栏的上游端头、标准段、过渡段、下游端头组成。任何一部分防护能力达不到,都会留下安全防护隐患^[1-4]。为提升路网系统的安全水

平,交通运输部先后发布《高速公路交通安全设施设计及施工技术规范》(JTJ 074—94)、《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2006)、《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017),对护栏的设置提出了不同要求。由于护栏建设时遵循的规范不

收稿日期:2024-12-24 修回日期:2025-04-17

作者简介:姜广伦,男,高级工程师.E-mail:JGL202412@163.com

*通信作者:尚钟平,男,硕士,助理工程师.E-mail:1453080542@qq.com

同、旧护栏得不到提升、提升后护栏结构形式不一致等原因,护栏之间过渡段防护能力不足的问题比较明显^[5-9]。现行规范对半刚性护栏与刚性护栏的过渡连接做了相关规定,并提出了通过翼墙过渡或将半刚性护栏搭接到刚性护栏上的解决思路,并给出了A级波形梁护栏同混凝土护栏过渡连接的具体方案。在实际工程中,考虑到护栏横断面形状、高度的差异,通过浇筑不同形状的混凝土翼墙,可实现半刚性护栏与刚性护栏安全、平顺过渡。但对于在役护栏改造工程,浇筑混凝土翼墙过渡方案存在施工周期长、施工条件复杂的问题,对交通的正常运行影响较大。

本文结合云南省昆明市某高速公路护栏提升工程,以波形梁护栏和组合式桥梁护栏的过渡为研究对象,针对混凝土翼墙过渡方案施工周期长、施工条件困难等问题^[10-11],提出一种防护能力为SB级的免翼墙过渡方案。该方案通过在连接处设置安装不同间距的打入立柱、异形钢构件,实现护栏的安全防护及快速安装。

1 护栏免翼墙过渡段设计研究

护栏免翼墙过渡段的设计主要考虑3个方面:①刚度过渡;②高度过渡;③横断面过渡^[12-15]。刚度过渡是为了保证过渡段刚度变化比较平缓,车辆碰撞护栏过程中护栏整体变形比较顺畅,引导车辆顺利导出,避免出现护栏局部刚度变化过大,护栏在该处的变形不协调,造成车辆阻滞的情况。高度过渡是为了保证护栏高度的变化比较平缓,避免护栏局部出现明显高度差,防止高出部分突兀,造成车辆阻滞的情况。横断面过渡主要是保证护栏横断面形状变化以渐变的形式实现,迎撞面比较平滑,不出现尖角结构。

1.1 护栏总体设计

护栏等级的确定:根据《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)^[16]的相关规定,不同防护等级或不同形式的护栏之间连接时,应进行过渡段设计。护栏过渡段的防护等级应不低于连接护栏中较低的防护等级。实际项目中主线钢护栏为A级或SB级,组合式桥梁护栏为SB级或SA级。考虑规范规定和项目的实际情况,将护栏等级确定为SB级。

护栏长度的确定:《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)^[16]规定,设计速度大于60 km/h的公路桥梁护栏与路基护栏的结构形式不同时,应设计过渡段。过渡段应采用设置端部翼墙或将半刚性护栏搭接到刚性护栏上的方式,采用搭接方式时,

路基段护栏应进行加强处理,长度不宜短于10 m。参考上述规定,并结合实际项目,对免翼墙及护栏加强段做出如图1所示的布置。

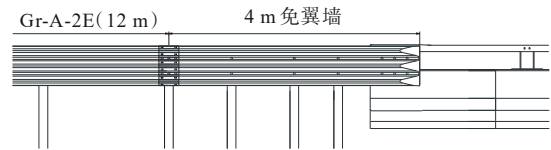


图1 护栏总体布置

Figure 1 Overall layout of guardrail

护栏高度的确定:由于免翼墙过渡段的防护能力为SB级,因此高度参考SB级护栏高度,同时兼顾项目现场组合式桥梁护栏的高度,护栏高度设置为950 mm。免翼墙过渡段的总体结构参数如表1所示。

表1 免翼墙过渡段总体结构参数

Table 1 Overall structural parameters of wing-wall-free transition section

防护等级	总长/m	总高/m
SB	16 (4 + 12)	0.95

与标准波形梁护栏、混凝土护栏不同,该总体结构的刚度在纵向上是渐变的,它能够实现波形梁护栏与组合式桥梁护栏平顺过渡。同时在4 m免翼墙过渡段的前方设置12 m的加强段(图1),可以规避失控车辆在免翼墙前方撞击护栏带来的相关风险。

1.2 刚度过渡研究

波形梁护栏属于半刚性护栏,车辆碰撞护栏过程中,护栏变形较大;组合式桥梁护栏属于刚性护栏,车辆碰撞护栏过程中,护栏变形小,两种护栏之间刚度差别较大。对于波形梁护栏,护栏的刚度取决于立柱刚度、土体的承载力及横梁刚度,其中立柱间距、立柱截面的抗弯截面系数,对于立柱刚度、护栏整体刚度影响较大。以SB级护栏为例,通过计算机仿真技术,研究立柱抗弯截面系数、立柱间距对护栏刚度的影响。

通过计算机仿真技术模拟中型客车碰撞不同立柱间距的SB级护栏,获得护栏的变形曲线,如图2所示。其中中客车质量为10 t、速度为80 km/h、碰撞角度为20°。

由图2可知:立柱间距分别为2.0 m、1.5 m、1.0 m、0.7 m、0.5 m、0.3 m时,对应的护栏最大变形量分别约为1.00 m、0.90 m、0.75 m、0.60 m、0.50 m、0.25 m。护栏刚度渐变趋势如图3所示。

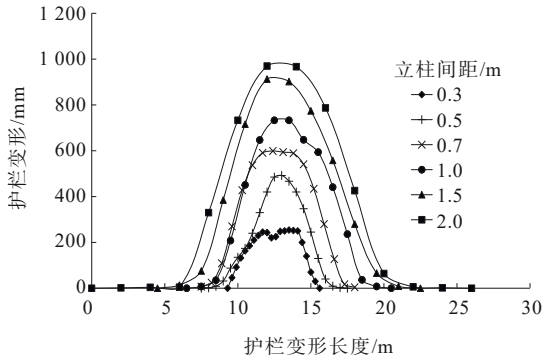


图2 护栏间距与护栏变形

Figure 2 Guardrail spacing and guardrail deformation

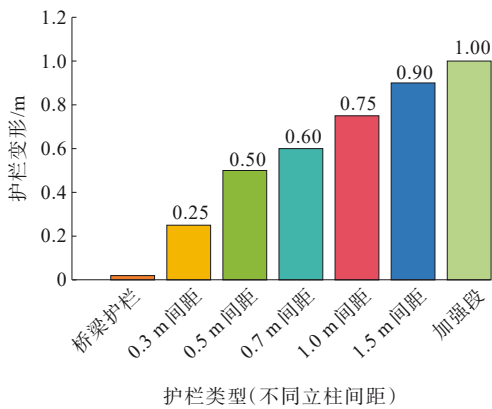


图3 护栏刚度渐变图

Figure 3 Gradient diagram of guardrail stiffness

由图3可知:通过调整护栏立柱间距,可实现护栏刚度的渐变,保证护栏刚度平缓过渡。但考虑项目现场情况,采用多种立柱间距施工不便,因此,选择0.5 m、0.7 m、1.0 m 3种立柱间距。其中:立柱间距为0.5 m,护栏变形为0.5 m,而组合式桥梁护栏属于刚性护栏,认为变形为0,二者刚度差别较大,因此通过调整立柱的截面形状对护栏刚度进行调整。将立柱的截面尺寸由130 mm×130 mm×6 mm调整为140 mm×140 mm×6 mm,分析护栏刚度过渡情况,结果如图4所示。

由图4可知:将立柱规格调整为140 mm×140 mm×6 mm后,立柱间距为0.5 m时,护栏变形为0.35 m,0.7 m间距的护栏变形为0.5 m,1 m间距的护栏变形为0.65 m。对于组合式桥梁护栏,分析时认为护栏变形为0,但实际护栏变形>0,因此初步认为组合式桥梁护栏与0.5 m间距的波形梁护栏刚度过渡比较平缓。考虑到免翼墙结构长度为4 m,因此确定立柱的布置间距为0.5 m、0.7 m、1.0 m、1.0 m。

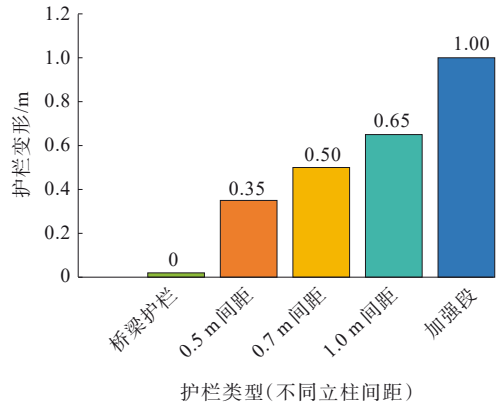


图4 优化护栏刚度渐变图

Figure 4 Gradient diagram of optimized guardrail stiffness

1.3 高度过渡研究

高度过渡设计是为了避免护栏过渡时出现明显的高差,防止在车辆碰撞护栏的过程中,高出部分造成车辆绊阻,甚至插入车体。通过计算机仿真技术,研究波形梁护栏与刚性混凝土护栏之间的高度差与大型车辆发生绊阻的关系(图5)。参考施工现场组合式桥梁护栏高度及规范的规定,混凝土护栏高度分别取0.95 m、1.00 m、1.10 m、1.20 m。钢护栏采用SB级护栏,护栏高度为0.95 m。

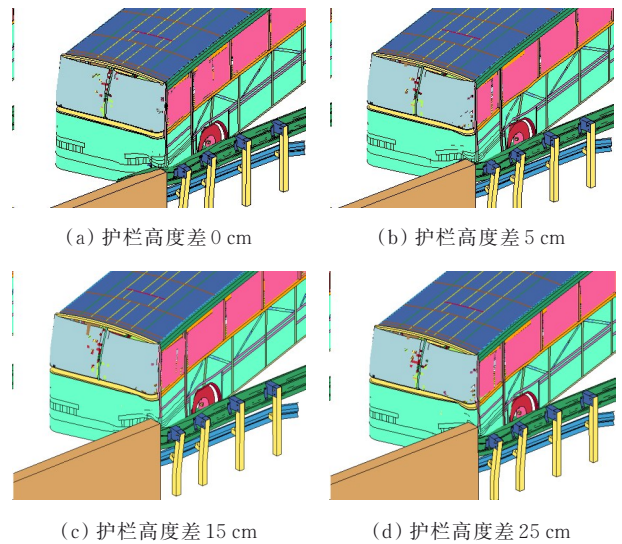


图5 护栏高度差对车辆导出的影响

Figure 5 Influence of guardrail height difference on vehicle redirection

由图5可知:刚性混凝土护栏与波形梁护栏高度差越大,碰撞过程中车辆头部与混凝土护栏接触的面积越大,车辆产生绊阻风险的概率越高。仿真结果显示,当混凝土高度≤1.1 m时,车辆能够安全导出,但高度越高,车头变形越严重。当护栏高度≥1.2 m时,车辆产生严重绊阻,车辆不能够正常导出。

因此,在组合式桥梁护栏与波形梁护栏的高度过渡设计中,当波形梁护栏高度为0.95 m,组合式护栏高度不得高于1.1 m。当两者高差较大时,需要借助高度过渡板提升波形梁护栏高度。

1.4 横断面过渡研究

组合式桥梁护栏的横断面图及波形梁护栏的横断面示意图如图6所示。

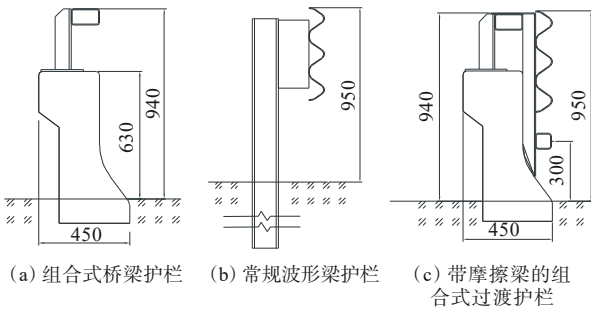


图6 护栏横断面图(单位:mm)

Figure 6 Cross-section diagram of guardrail(unit: mm)

设计中,将波形梁护栏的迎撞面和组合式桥梁护栏的内侧边缘平齐。由于三波板和混凝土坡面的距离较大,因此在该位置设计单独的连接板。连接板和组合式桥梁护栏连接,三波板和连接板连接。为了保证三波板和连接板连接的可靠性,三波板与连接板连接长度约为0.8 m。考虑波形护栏与组合式护栏连接处下方混凝土结构比较突出,碰撞中存在小车发生绊阻的风险,因此在该处设置摩擦梁保证小型客车正常导出。

1.5 免翼墙过渡段具体方案研究

参考护栏总体结构的设计,刚度过渡研究、高度过渡研究及横断面过渡研究的结论,对过渡段进行详细的设计,最终的方案如图7所示。



图7 免翼墙过渡段设计方案(单位:m)

Figure 7 Design scheme of wing-wall-free transition section(unit: m)

免翼墙过渡段高度0.95 m,长度4 m,立柱规格为140 mm×140 mm×6 mm,立柱间距依次为0.5 m、0.7 m、1.0 m、1.0 m。免翼墙过渡段外接12 m护栏加强段。同时考虑碰撞过程中碰撞力的传递路径为:波形梁→防阻块→立柱→地基。为了保证地基的承载力,

在立柱底部焊接加强钢板,增加立柱的背土质量。其中连接板的设计如图8所示,连接板通过上边的4颗螺栓和横梁连接,通过下边的3颗螺栓和混凝土连接,三波板和连接板通过中间的6个螺栓连接,摩擦梁通过下方3颗螺栓与连接板连接。连接板的背部设置加强筋板,增加连接板的刚度。同时通过将连接板端部折弯,实现连接板与组合式桥梁护栏的过渡。

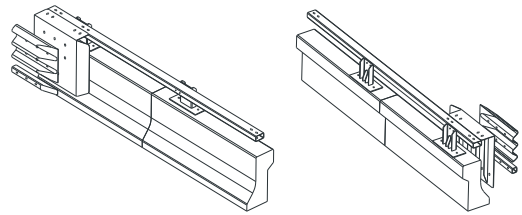


图8 连接板细节图

Figure 8 Detail diagram of connecting plate

该方案通过立柱、三波板、异形钢构件实现组合式桥梁护栏与波形梁护栏过渡,克服了混凝土翼墙施工周期长、施工条件复杂的缺点。同时,针对不同横断面形式的刚性护栏,可通过对异形钢构件进行调整,实现护栏之间的可靠连接。

2 免翼墙过渡段防护性能仿真分析验证

目前世界各国主要通过实车足尺碰撞试验方法来评价护栏的安全性能。但该方法费用高、周期长,需要消耗较多的人力物力。随着计算机仿真方法日趋成熟,该方法在碰撞护栏领域得到了广泛的应用^[17-21]。本文采用计算机仿真方法对护栏的性能进行评估。参考《公路护栏安全性能评价标准》(JTGB05-01—2013)^[17]的要求,对长度约为48 m的护栏进行仿真分析,其中波形梁护栏布设长度为32 m,具体布设方案为:4 m免翼墙段+12 m标准护栏加强段(Gr-A-2E)+16 m标准护栏段(Gr-A-4E),组合式桥梁护栏布设长度为16 m,仿真碰撞条件见表2。

碰撞位置选为免翼墙过渡段的1/2处,仿真结果见表3。仿真结果表明:碰撞过程中无车辆穿越、翻越和骑跨,同时护栏构件及脱离件未侵入车辆乘员舱,说明免翼墙过渡段满足阻挡功能的要求;碰撞后车辆没有翻车,且车辆的轮迹符合驶出框的规定,免翼墙过渡段满足导向功能的要求。对于小型客车,碰撞过程中乘员的碰撞速度X向分量为4.8 m/s, Y向分量为2.2 m/s,均小于12 m/s。乘员碰后加速度X向分量为45.5 m/s², Y向分量为162 m/s²,均小于

200 m/s²,因此免翼墙过渡段满足缓冲功能的要求。综上所述,通过计算机仿真分析可知,该免翼墙过渡段的评价指标均满足标准要求,防护等级能够达到SB级,但仍需要通过实车足尺碰撞试验进一步验证。

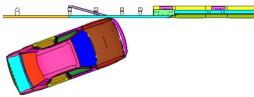
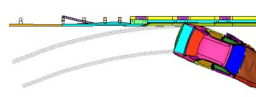
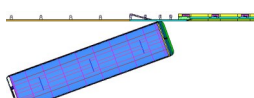
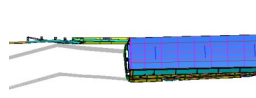
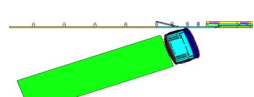
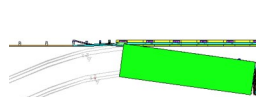
表 2 仿真碰撞条件

Table 2 Simulation collision conditions

防护等级	碰撞车型	车辆总质量/t	碰撞速度/(km·h ⁻¹)	碰撞角度/(°)
四(SB)级	小型客车	1.5	100	20
	中型客车	10.0	80	20
	大型货车	18.0	60	20

表 3 仿真分析结果

Table 3 Results of simulation analysis

碰撞车型	碰撞结果	
	初始时刻	结束时刻
小型客车		
中型客车		
中型货车		

3 免翼墙过渡段防护性能实车足尺碰撞试验验证

对免翼墙过渡段进行实车足尺碰撞试验,进一步验证免翼墙过渡段的安全防护功能。护栏的现场安装如图9所示。

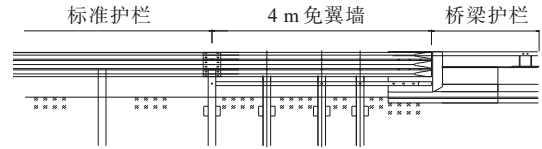


图 9 试验护栏安装图

Figure 9 Installation diagram of test guardrail

其中组合式桥梁护栏和波形梁护栏的设置长度参考标准相关要求,刚性护栏长度不小于15 m、半刚性护栏不小于25 m,具体护栏长度约为48 m,其中波形梁护栏布设长度为32 m,包括4 m 免翼墙段+12 m 标准护栏加强段(Gr-A-2E)+16 m 标准护栏段(Gr-A-4E),组合式桥梁护栏布设长度为16 m。组合式桥梁护栏的结构形式参考施工现场组合式桥梁护栏的形式,标准护栏的结构形式参考《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)中的A级护栏。表4、表5为车辆的轨迹、护栏变形及试验数据。

由表4、表5可知:免翼墙过渡段具有较好的安全防护性能,能够与波形梁护栏、组合式护栏形成可靠连接,实现波形梁护栏与组合式护栏之前的刚度过渡、高度过渡、横断面过渡。碰撞过程中,无车辆穿越、翻越和骑跨,护栏构件及脱离件也没有侵入车辆乘员舱,说明免翼墙结构满足阻挡功能的要求;碰撞后车辆没有翻车,且车辆的轮迹符合驶出框的规定,表明免翼墙结构满足导向功能的要求。对于小型客车,碰撞过程中乘员的碰撞速度X向分量为5.3 m/s, Y向分量为1.7 m/s,均小于12 m/s。乘员碰后加速度X向分量为50.1 m/s², Y向分量为154.6 m/s²,均小于200 m/s²,因此免翼墙过渡段满足缓冲功能的要求,其防护能力能够达到标准规范的SB级防护能力。

表 4 车辆轨迹及护栏变形情况

Table 4 Vehicle trajectory and guardrail deformation conditions













试验车型	车辆轨迹		护栏变形	
小型客车				
中型客车				
大型货车				

表5 试验数据
Table 5 Test data

试验车型	D/m	W/m	$V_l/$ ($m \cdot s^{-1}$)	$V_{ln}/$ ($m \cdot s^{-1}$)	速度		加速度	
					$X/(m \cdot s^{-1})$	$Y/(m \cdot s^{-1})$	$X/(m \cdot s^{-2})$	$Y/(m \cdot s^{-2})$
小型客车	0.00	0.40	—	—	5.3	1.7	50.1	154.6
中型货车	0.15	0.45	0.50	0.70	—	—	—	—
中型客车	0.20	0.50	0.85	1.70	—	—	—	—

注: D为护栏碰撞后的最大变形量; W为护栏碰撞后的残余变形量; V_l 为车辆碰撞时护栏的初始碰撞速度分量; V_{ln} 为车辆碰撞护栏后的残余速度分量。

4 结语

针对在役护栏升级改造中波形梁护栏与组合式桥梁护栏过渡连接问题,本文提出一种施工高效、方便的免翼墙过渡段方案。对免翼墙过渡段的刚度过渡、高度过渡、横断面过渡进行分析研究,考虑立柱对护栏整体刚度影响较大,通过调整立柱间距、优化立柱截面尺寸的方式,实现刚度过渡。对于高度过渡,通过仿真分析得出:当护栏高差小于150 mm时,车辆绊阻风险小,该指标可为实际护栏的设计、施工提供一定的参考。在横断面过渡中,强调横断面的平缓过渡。通过计算机仿真技术和实车碰撞试验对免翼墙过渡段的具体方案进行验证,其中护栏总长度约为48 m。结果均表明:免翼墙过渡段具有较好的阻挡、导向、缓冲功能,能够实现相应车辆的安全防护,防护能力能够达到标准规定的SB级要求。综上,该免翼墙过渡段能够实现波形梁护栏与组合式桥梁护栏的可靠连接,为解决二者的连接问题提供了一种较简单、方便的方案。

参考文献:

References:

- [1] 周志伟, 吴洵, 王成虎. 波形梁护栏与混凝土护栏过渡段安全性能研究[J]. 公路工程, 2016, 41(3): 162-164, 171.
ZHOU Zhiwei, WU Xun, WANG Chenghu. Research on safety performance of transition between W-beam guardrail and concrete barrier[J]. Highway Engineering, 2016, 41(3): 162-164, 171.
- [2] 郭科. 桥梁防撞墙与路基护栏衔接段过渡翼墙设计探讨[J]. 北方交通, 2019(4): 34-37.
GUO Ke. Discussion on design of transitional wing wall in connection section of anti-collision wall and subgrade guardrail of bridge[J]. Northern Communications, 2019 (4): 34-37.
- [3] 赖友兵, 王婷静. 高等级公路路桥过渡段护栏结构设计[J]. 公路, 2008, 53(3): 197-200.
- [4] LAI Youbing, WANG Tingjing. Guard rail structure design of transition section of highway and bridge on high grade highway[J]. Highway, 2008, 53(3): 197-200.
徐伟龙, 项彦茂, 谢喆, 等. 高速公路路侧护栏改造设计研究综述[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(18): 191-194.
XU Weilong, XIANG Yanmao, XIE Zhe, et al. Summary of research on reconstruction design of roadside guardrail of expressway[J]. Transportation Technology and Management, 2024, 5(18): 191-194.
- [5] 刘新萍, 张世辉, 尚钟平, 等. 高速公路旧桥桥梁护栏提升发展研究[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 260-266.
LIU Xinping, ZHANG Shihui, SHANG Zhongping, et al. Guardrail improvement for old bridges in expressways[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2): 260-266.
- [6] 翟璐. 我国高速公路路侧护栏的安全设计分析[J]. 江西建材, 2015(20): 190-190, 192.
ZHAI Lu. Safety design analysis of roadside guardrail of expressway in China[J]. Jiangxi Building Materials, 2015 (20): 190-190, 192.
- [7] 龚帅, 刘航, 邓宝, 等. 在役旧桥梁组合式护栏升级改造研究[J]. 中外公路, 2021, 41(1): 314-318.
GONG Shuai, LIU Hang, DENG Bao, et al. Research on upgrading and reconstruction of in-service aging bridges [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(1): 314-318.
- [8] 段俊杰, 林福宽. 基于车撞性能的既有护栏改造提升方案分析[J]. 公路, 2024, 69(11): 280-285.
DUAN Junjie, LIN Fukuan. Analysis of upgrading scheme of existing guardrail based on vehicle crash performance[J]. Highway, 2024, 69(11): 280-285.
- [9] 陈晖, 姜超, 丁旭东, 等. 波形梁钢护栏升级改造技术研究[J]. 中外公路, 2016, 36(2): 331-334.
CHEN Hui, JIANG Chao, DING Xudong, et al. Study on upgrading technology of corrugated beam steel guardrail [J]. Journal of China & Foreign Highway, 2016, 36(2): 331-334.
- [10] 宁欣鹏, 高真岩. SB级免翼墙路基桥梁过渡段护栏施工技术探究[J]. 中国公路, 2023(23): 98-100.
NING Xinpeng, GAO Zhenyan. Discussion on construction technology of guardrail in transition section of SB-class wing-free subgrade bridge[J]. China Highway, 2023(23): 98-100.

- [11] 袁涌升. 高速公路桥梁护栏端头搭接的优化设计[J]. 四川水泥, 2023(8): 253-255.
YUAN Yongsheng. Optimal design of lap joint of guardrail end of expressway bridge[J]. Sichuan Cement, 2023(8): 253-255.
- [12] 李双祥, 李艳玲, 马燕翔. 梁柱式护栏与SB级波形梁护栏过渡段安全性能分析[J]. 交通世界, 2021(17): 115-117.
LI Shuangxiang, LI Yanling, MA Yanxiang. Safety performance analysis of transition section between beam-column guardrail and SB-class corrugated beam guardrail[J]. TranspoWorld, 2021(17): 115-117.
- [13] 于水, 解廷利, 刘怡美, 等. 防绊阻路桥护栏过渡段结构设计及安全性能研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 317-321.
YU Shui, XIE Tingli, LIU Yimei, et al. Study on structural design and safety performance of transition section of anti-trip road and bridge guardrail[J]. Highway, 2022, 67(10): 317-321.
- [14] 宋彦琦, 邓超. 新型过渡段护栏的力学机理与数值模拟[J]. 中国公路学报, 2012, 25(1): 40-46.
SONG Yanqi, DENG Chao. Mechanical mechanism and numerical simulation of new guard rail of transition section[J]. China Journal of Highway and Transport, 2012, 25(1): 40-46.
- [15] 邵永刚, 赵震宇, 陈红缨, 等. 高度自适应护栏过渡段研究[J]. 公路工程, 2011, 36(1): 12-15, 24.
TAI Yonggang, ZHAO Zhenyu, CHEN Hongying, et al. Research on barrier transition with height self-applied function[J]. Highway Engineering, 2011, 36(1): 12-15, 24.
- [16] 交通运输部公路科学研究院. 公路交通安全设施设计细则: JTG/T D81—2017[S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. Design specification for highway safety facilities: JTG/T D81—2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [17] 北京深华达交通工程检测有限公司. 公路护栏安全性能评价标准: JTG B05-01—2013[S]. 北京: 人民交通出版社, 2013.
Beijing Shenhuada Transportation Engineering Testing Co., Ltd.. Standard for safety performance evaluation of highway barriers: JTG B05-01—2013[S]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [18] 闫书明. 有限元仿真方法评价护栏安全性能的可行性[J]. 振动与冲击, 2011, 30(1): 152-156.
YAN Shuming. Feasibility analysis of barrier safety evaluation with finite element simulation method[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(1): 152-156.
- [19] 北京华路安交通科技有限公司. 公路护栏安全性能仿真评价技术规程: T/GDHS 001—2020[S]. 广州: 广东省公路学会, 2020.
Beijing Hualuan Traffic Technology Co., Ltd.. Specifications for safety performance simulation evaluation of highway barriers: T/GDHS 001—2020[S]. Guangzhou: Guangdong Province Highway Society, 2020.
- [20] 龚帅. 混凝土护栏坡面参数对防护车辆撞击作用的影响[J]. 中外公路, 2024, 44(2): 243-251.
GONG Shuai. Influence of concrete barrier slope parameters on protective effect against vehicle collision[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(2): 243-251.
- [21] 钟纯耀, 马晴, 李扬帆, 等. 无种植土中央分隔带优化型混凝土护栏安全性研究[J]. 中外公路, 2024, 44(3): 246-252.
ZHONG Chunyao, MA Qing, LI Yangfan, et al. Safety of optimized concrete median barrier without planting soil[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2024, 44(3): 246-252.