

基于SB级波形梁护栏的有效高度保持设计研究

姚望¹, 王胜辉², 龚帅³, 赵浩泽³, 韩洪超¹

(1. 山东高速股份有限公司, 山东 济南 250014; 2. 山东高速工程项目管理有限公司, 山东 济南 250013; 3. 北京华路安交通科技有限公司, 北京市 100070)

摘要: 针对现有SB级波形梁护栏在路面加铺后有效高度下降、防护性能衰减的问题, 提出一种融合动态变形补偿与静态高度调节的双机制协同保持设计方案。通过构建类平行四边形防阻块结构, 能实现碰撞过程中的动态抬升补偿, 最大动态补偿量可达175 mm; 配合立柱预留孔系模块化调节系统, 可实现100 mm加铺厚度下的高度调节。另外, 基于有限元方法建立模型, 依据《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)开展碰撞仿真, 并在小型客车、中型客车和大型货车撞击工况下进行实车足尺试验验证。结果表明: 该护栏在加铺前后的各项安全指标均符合上述标准要求, 其有效高度保持稳定, 且具备施工便捷、经济高效的特点。研究成果为解决公路护栏在改扩建工程中的高度适应性难题提供了系统性解决方案, 具有重要的工程应用价值。

关键词: 交通工程; 有效高度保持; 协同机制; SB级波形梁护栏; 有限元方法

中图分类号: U491.59

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)06-0126-06

Research on the Design of Effective Height Maintenance Based on SB Class Corrugated Beam Guardrail

YAO Wang¹, WANG Shenghui², GONG Shuai³, ZHAO Haoze³, HAN Hongchao¹

(1. Shandong Hi-Speed Company Limited, Jinan 250014, China; 2. Shandong High Speed Engineering Consultants Co., Ltd., Jinan 250013, China; 3. Beijing Hualuan Traffic Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract: Aiming at the problem of reduced effective height and diminished protective performance of existing SB-level wavy-beam guardrails after pavement overlay, this study proposes a dual-mechanism cooperative maintenance design scheme that integrates dynamic deformation compensation and static height adjustment. By constructing a parallelogram-like blocking device structure, dynamic lift compensation during collisions is achieved, with a maximum dynamic compensation of 175 mm. Coupled with a modular adjustment system utilizing reserved holes on the guardrail posts, height adjustment for an overlay thickness of 100 mm is realized. In addition, a model was established based on the finite element method, and collision simulations were conducted in accordance with the Highway Guardrail Safety Performance Evaluation Standard (JTG B05-01—2013). Full-scale vehicle impact tests were carried out under conditions involving small passenger cars, medium buses, and large trucks. The results show that the guardrail meets all safety specification requirements both before and after overlay construction, maintains stable effective height, and offers advantages such as convenient construction and cost-effectiveness. This research provides a systematic solution to the challenge of height adaptability of highway guardrails in reconstruction and expansion projects, demonstrating significant engineering application value.

Keywords: traffic engineering; effective altitude holding; synergy mechanism; SB level W-beam barriers; finite element method

0 引言

公路波形梁护栏作为道路安全防护的关键设施, 其有效高度直接决定了护栏的防护性能。郭忠

印等^[1]研究表明, 护栏防护高度降低100 mm是车辆侧翻的临界状态, 当高度衰减超过该阈值时, 将严重威胁高速公路的行车安全。在公路改扩建及路面加铺工程中, 护栏有效高度衰减已成为普遍存在的工程难题, 亟需开发兼顾安全性与经济性的护栏高度保持技术。

传统高度补偿技术多采用内套管加高护栏方案。在有关保持SB级波形梁护栏有效高度的研究

收稿日期: 2025-12-31

作者简介: 姚望(1981—), 男, 本科, 工程师, 从事道路交通研究。

通信作者: 龚帅(1989—), 男, 硕士, 高级工程师, 从事交通运输研究工作。电子信箱: gongshuaizhen@163.com

中,卢健等^[2]采用套管加高的方式,虽然能实现对护栏的加高,但该方式安装过程复杂,且成本较高。防阻块作为关键吸能部件,其结构优化备受关注。李远军等^[3]设计的F型防阻块,可以使护栏在受到车辆碰撞后逐渐变形,使波形梁护栏中心高度提高4~6 cm。但是,该方案的防阻块调节范围有限,无法适应大幅度的路面高程变化,缺少一定的静态调节能力。王维利等^[4]提出的弧形防阻块、刘彬等^[5]经过优化的梯形防阻块,均聚焦于吸能效率提升,而未将动态抬升量作为核心设计目标,动态补偿与防护性能的平衡设计不足。现有技术多局限于单一机制的优化,静态调节类技术缺乏动态碰撞过程中的高度自适应能力,动态补偿类技术则无法适配路面加铺带来的静态高程变化,两者的协同设计尚未形成成熟方案。陈岳峰等^[6]在旧护栏改造研究中提出“结构调整+性能验证”的思路,但未涉及动态与静态机制的协同;刘晓波等^[7]通过仿真优化护栏梁板中心高度,但仍未解决2种机制的兼容问题。

综合现有技术特征分析,当前有关保持SB级波形梁护栏有效高度的研究存在三方面局限:(1)复杂的结构设计,以及安装和施工成本制约了工程经济性;(2)动态变形补偿能力不足;(3)静态调节与动态补偿机制难以协同工作。为此,本研究提出类平行四边形防阻块与多级调节立柱协同设计方案,通过撞击中的变形实现动态抬升,并结合预留螺栓孔系完成静态调节补偿。同时,基于有限元仿真模拟方法,对SB级波形梁护栏有效高度保持方案进行验证,为公路护栏改造提供新方法。

1 原SB级波形梁护栏使用现状

现行《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)给出了推荐的SB级波形梁护栏结构^[8],其三波形梁板规格为506 mm×85 mm×4 mm;立柱采用方管立柱,规格为130 mm×130 mm×6 mm;防阻块采用飞机翅型设计,规格为300 mm×300 mm×290 mm×4.5 mm。

现行规范给出的标准SB级波形梁护栏结构如图1所示。

某些工程中将SB级波形梁护栏防阻块上部开孔,并在立柱上设置预留孔,若后期护栏板高度不够就可将护栏板上移,保证公路护栏的有效高度(见图2(a))。该方式虽然可以保证护栏的有效高度,但会改变原有护栏的受力模式。在图2(b)中,标准SB级

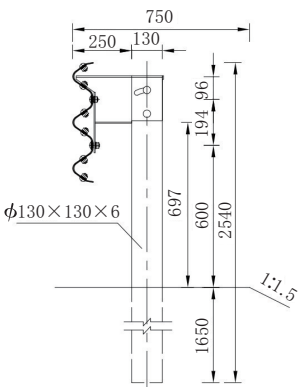


图1 现行规范给出的标准SB级波形梁护栏结构(单位:mm)

波形梁护栏防阻块与立柱的连接位置②为长孔,车辆碰撞后会以①点为圆心进行旋转,从而对保持梁板高度有利。标准防阻块碰撞后的姿态如图3所示。若防阻块上部开孔,则由于立柱加高部分的阻挡,将使其丧失该功能。图4为SB级波形梁护栏防阻块上部开孔后的仿真碰撞试验结果,可以看出中型客车发生了骑跨护栏现象。鉴于此,有必要对护栏结构进行更为深入的设计优化,确保护栏具有高度保持功能的同时,保证护栏的安全防护能力。



(a) 某些工程中应用的SB级波形梁护栏 (b) 规范给出的标准SB级波形梁护栏

图2 防阻块上部开孔与标准SB级波形梁护栏



图3 标准防阻块碰撞后姿态图

2 有效高度保持设计方案

2.1 设计原理

基于动态变形补偿与静态高度调节双机制,构建适应路面高程变化的护栏有效高度保持方案。通过类平行四边形防阻块的几何变形特性,在碰撞过程中实现波形梁板的动态抬升;结合立柱预留孔系

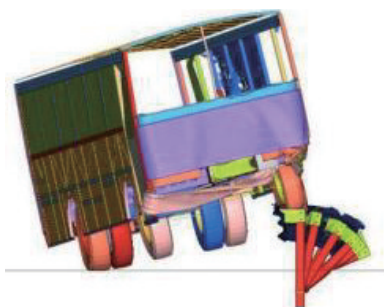


图4 仿真碰撞试验结果

的静态调节功能,在路面加铺后完成护栏整体高度的人工调整^[9-11]。2种机制的协同作用,可确保护栏在各种工况下始终保持有效高度,从而提高道路安全性。

2.2 结构设计

2.2.1 防阻块动态补偿设计

类平行四边形防阻块采用多边形框架结构设计^[12-13],利用多边形框架受力后夹角发生变化的现象,实现波形梁板的动态抬升(见图5),其关键参数包括:

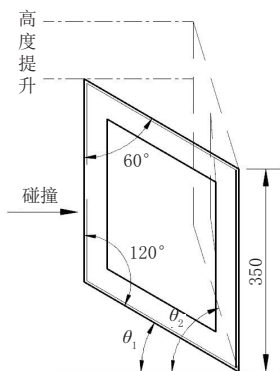


图5 类平行四边形防阻块(单位:mm)

- (1)框架高度:350 mm(初始安装态)。
- (2)钝角设计:118°±2°(顶端夹角)。
- (3)锐角设计:58°±2°(底端夹角)。
- (4)板材厚度:4 mm。

碰撞过程中,斜板受轴向压力碰撞后形成角度 θ (θ 为下斜板与水平面夹角,30°< θ <90°)。由几何关系推导的护栏高度增益 ΔH 用下式计算:

$$\Delta H = L(\sin \theta_2 - \sin \theta_1) \quad (1)$$

式中: L 为斜板长度(350 mm); $\theta_1=30^\circ$,为变形前倾角; θ_2 为变形后倾角,接近于90°。

由式(1)可得,最大动态补偿量 $\Delta H_{\max}=175$ mm。

2.2.2 立柱静态高度调节设计

立柱规格:130 mm×130 mm×6 mm 方管,埋深1.65 m。预留孔系:沿立柱轴线设置5组 $\phi 22$ 螺栓孔,间距呈均等分布($s=50$ mm)。路面加铺厚度 Δh

时,通过螺栓孔位调整,实现高度补偿 H_{adjusted} :

$$H_{\text{adjusted}} = H_0 - \Delta h + (n \cdot s) / k \quad (2)$$

式中: H_0 为基准高度,697 mm; s 为孔距,50 mm; n 为调节孔位数;考虑安全冗余,安全系数 k 取为1.25。当 $\Delta h=100$ mm时,选择 $n=3$,即可精确补偿高度损失。

在设计立柱预留孔时,需要充分考虑路面加铺或改造后可能的高度变化范围^[14-15],并合理设置预留孔的位置和数量(见图6)。

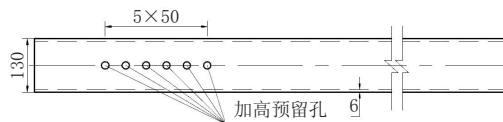


图6 立柱设置加高预留孔(单位:mm)

经过结构系统设计,得到路面加铺前后的三波形梁护栏结构,见图7。

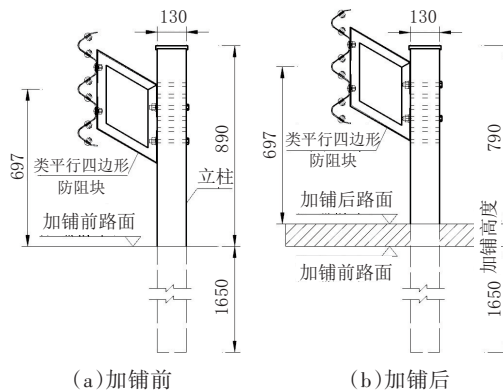


图7 路面加铺前后三波形梁护栏结构(单位:mm)

3 计算机仿真分析

3.1 仿真模型验证

根据《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)(以下简称《评价标准》)中的试验车辆类型,按照实际车辆的质量、重心位置和基本尺寸建立小型客车、中型客车、大型货车的仿真模型。

车辆碰撞波形梁护栏过程的仿真与试验对比见图8。

由图8可知,3种车辆行驶姿态基本相同,碰撞后护栏整体变形情况相似,且缓冲性能指标以及护栏变形指标的仿真值与试验值基本一致,误差在10%左右(见表1、表2)。从车辆行驶姿态、缓冲性能及护栏变形角度验证了仿真模型的可靠性,为采用该模型进行护栏方案的安全性能分析奠定了基础。

3.2 护栏的安全性能仿真分析

采用经过实车试验验证的仿真模型,建立路面加铺前后SB级三波形梁护栏结构模型和车辆模型。

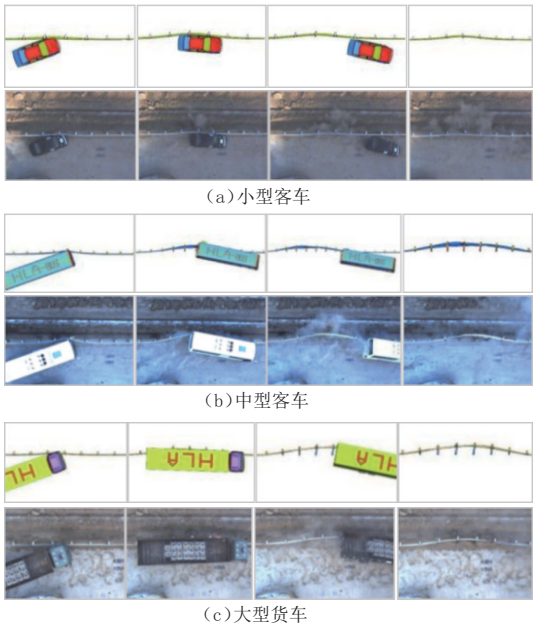


图8 碰撞过程仿真与试验对比
表1 缓冲性能指标仿真与试验对比

缓冲性能指标	试验结果	仿真结果	仿真误差/%
乘员碰撞速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	3.4	3.8	11.7
乘员碰撞后加速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	128	112	12.5

表2 护栏变形指标仿真与试验对比

碰撞车型	护栏最大横向动态位移外延值 W/m		仿真误差/%
	试验结果	仿真结果	
中型客车	1.25	1.26	0.8
大型货车	1.30	1.17	10.0

根据现行《评价标准》中SB级碰撞试验条件(见表3),对路面加铺前后SB级三波形梁护栏进行安全性分析^[16]。由于路面加铺后,护栏升高到最高位置是安全防护的最不利状态,因此选择最高预留螺栓孔位置连接。

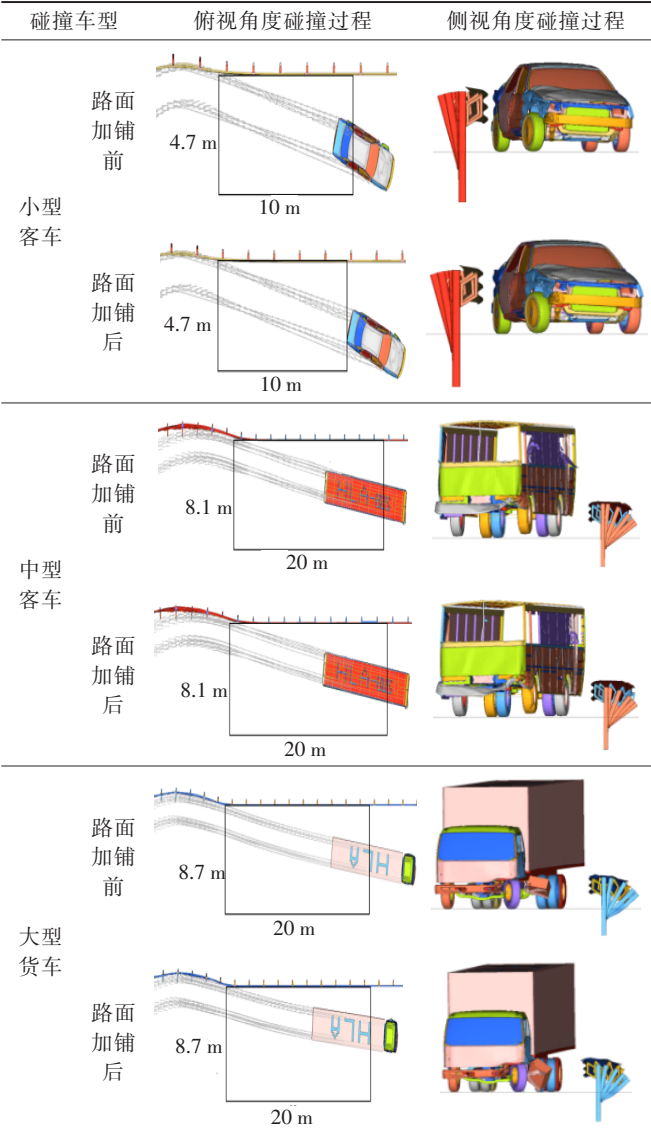
表3 SB级试验碰撞条件

碰撞车型	车辆总质量/ t	碰撞速度/($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	碰撞角度/($^{\circ}$)
小型客车	1.5	100	20
中型客车	10	80	20
大型货车	18	60	20

路面加铺前后车辆碰撞护栏过程对比分析见表4。

由表4可知,在SB级三波形梁护栏与3种车型碰撞试验中,不同路面条件下(路面加铺前和加铺后)均观测到良好的碰撞响应特征^[17]。具体表现为:车辆碰撞后未发生穿越、翻越或骑跨等侵入性失效模式,其运动轨迹始终受控于护栏导向范围;碰撞过程中车辆横向偏移量稳定于安全阈值范围,且碰撞后2.5 s内即恢复纵向姿态角平衡。这些表现充分验证了护栏系统的动态阻挡效能和连续导向能力。

表4 路面加铺前后车辆碰撞护栏过程对比分析



试验对比分析(见表5)表明,路面加铺前和加铺后,护栏变形指标与车辆外倾值基本一致,护栏最大横向动态变形量 D 与最大横向动态位移外延值 W 均不超过1.5 m,说明护栏在受到撞击时的横向水平变形效果良好。图9所示为护栏碰撞前后有效高度的对比结果。由图9可见,其有效高度基本保证不变。这主要得益于防阻块的动态补偿设计。防阻块被压扁后,其高度增益可达到17.5 cm左右,从而有效补偿了立柱弯折倒伏后引起的波形梁板下降。

表5 路面加铺前后护栏变形指标与车辆外倾指标对比分析

碰撞车型	护栏最大横向动态变形量 D/m		护栏最大横向动态位移外延值 W/m	
	路面加铺前	路面加铺后	路面加铺前	路面加铺后
小型客车	0.453	0.452	0.834	0.790
中型客车	1.252	1.242	1.439	1.327
大型货车	1.126	1.130	1.410	1.318

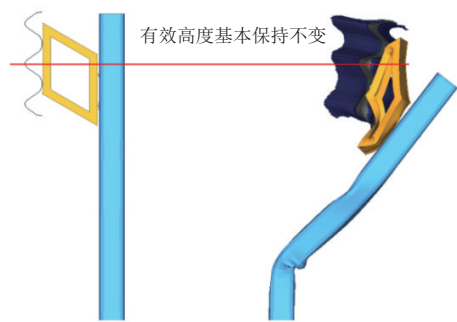


图9 护栏碰撞后变形情况

小型客车碰撞路面加铺前的护栏时,其纵向、横向乘员碰撞速度分别为3.75、6.31 m/s,乘员碰撞后加速度分别为36.59、82.51 m/s²;碰撞路面加铺后的护栏时,其纵向、横向乘员碰撞速度分别为3.69、6.31 m/s,乘员碰撞后加速度分别为36.22、82.66 m/s²,均满足《评价标准》对乘员碰撞速度不得大于12 m/s、乘员碰撞后加速度不得大于200 m/s²的要求,说明护栏缓冲功能良好^[18]。

路面加铺前后乘员碰撞后加速度曲线图见图10、图11。

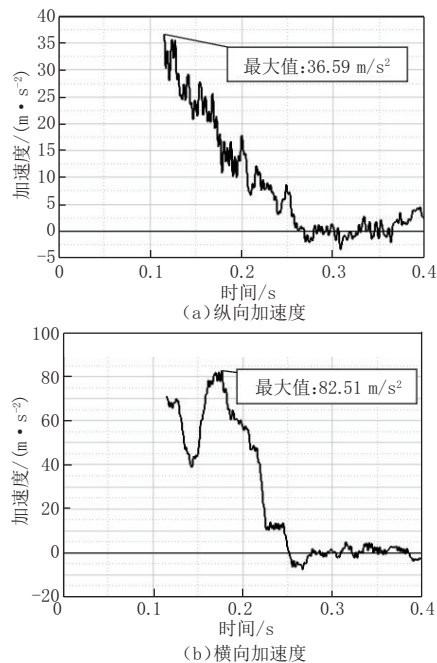


图10 路面加铺前乘员碰撞后加速度曲线图

综上所述,通过计算机仿真分析,该方案在护栏加铺前和加铺后,各项指标均满足《评价标准》的要求。采用动态变形补偿与静态高度调节双机制,为SB级波形梁护栏的高度保持提供了有效的解决方案。

4 实车足尺碰撞试验

为进一步验证基于动态变形补偿与静态高度调

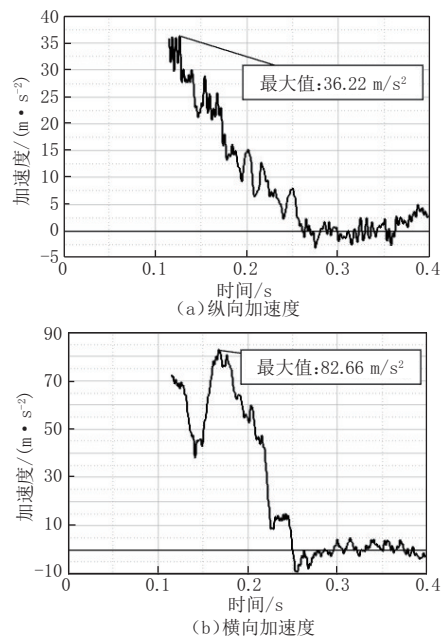


图11 路面加铺后乘员碰撞后加速度曲线图

节双机制的有效高度保持设计方案是否具有实际效果及其安全性,开展了实车足尺碰撞试验。试验严格按照《评价标准》进行。

在试验过程中,对车辆碰撞护栏后的运动轨迹、护栏的变形情况等进行了全方位监测和记录。

3种车型碰撞护栏过程图见图12;护栏变形情况见图13。

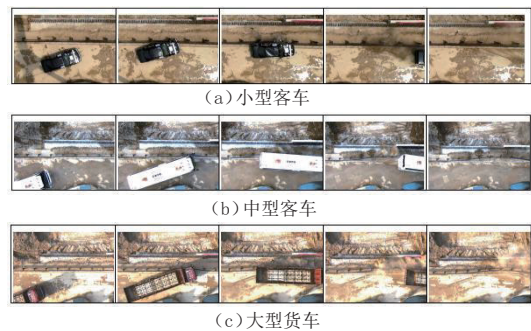


图12 3种车型碰撞护栏过程图

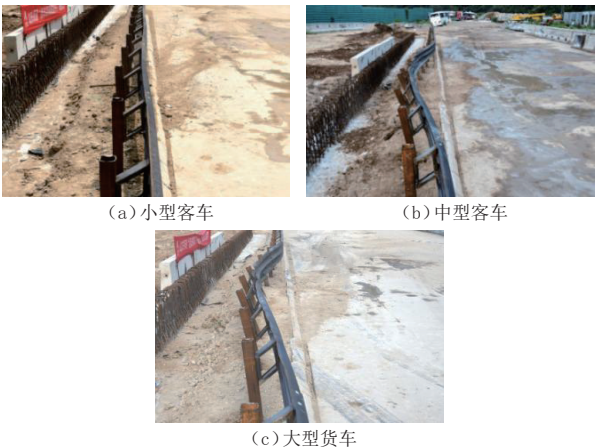


图13 3种车型碰撞后护栏变形图

试验结果表明,3种车型在碰撞护栏后,均未发生穿越、翻越或骑跨护栏等危险情况,车辆运动轨迹始终在护栏的有效导向范围内,且碰撞后能较快恢复稳定姿态。同时,护栏在经受碰撞后,虽然产生了一定变形,但仍能保持良好的结构完整性,有效高度基本维持稳定,充分发挥了其防护功能。

综上所述,该护栏强度足以防护大型客车和货车,且未引发小型客车绊阻现象,进一步证明了该护栏设计方案在实际应用中的可靠性和安全性,为其在公路工程中的广泛应用提供了坚实的实践依据。

5 应用效果

具备有效高度保持功能的SB级波形梁护栏在实际工程中已被广泛应用(见图14)。其应用效果主要体现在施工便捷性、安全可靠性和显著经济性三方面。



图14 护栏安装及应用照片

在施工方面,该护栏系统安装工序简便,线形协调平顺。尤其在道路加铺改造场景中,基于立柱预留孔或活动套管的高度调节机制展现出突出优势。施工时无需拆除既有结构,仅需3名技术人员配合1辆养护车,即可完成波形梁板及防阻块的整体上移安装,日均调整长度可达250~350 m。相较于传统新建护栏,可减少约5名安装人员及打桩机等重型设备,施工效率提升明显,周期缩短约40%。

在经济性方面,该设计通过重复利用原有护栏主体结构,大幅降低了材料和施工成本。以立柱预留孔式A级三波形梁护栏为例测算,每延千米单侧钢材用量约为31.5 t,以镀锌钢材单价6 000元/t计,双侧护栏每延千米可节约钢材费用约37.8万元。同时,由于避免了旧护栏拆除和新护栏安装的全过程,施工综合成本进一步降低,具备良好的全生命周期

经济性。

在安全性能方面,该结构在调整后仍保持与原设计一致的防护等级。实际碰撞试验和工程应用表明,该结构能有效阻挡并导向失控车辆,防止车辆穿越、翻越等事故形态,碰撞后车辆可沿护栏平稳导出,为驾乘人员提供了持续可靠的安全保障。

综上,该护栏系统在实现有效高度保持的同时,兼顾了施工便捷、成本节约与安全可靠,适用于高速公路新建及改扩建工程,具有良好的推广应用价值。

6 结 语

(1)构建了动态补偿与静态调节协同作用的高度保持机制,形成了完整的设计理论。研究突破了传统单一加高或局部加固的技术思路,创新性地将类平行四边形防阻块的碰撞变形与立柱预留孔系的调节相结合,形成了一套兼顾即时碰撞安全与长期使用维护的护栏高度保持解决方案。该机制在理论层面明确了“动态即时补偿(最大175 mm)+静态人工调节(100 mm范围)”的协同路径,为工程实践提供了清晰的设计框架。

(2)建立了关键结构参数与系统性能间的量化关系,形成了面向性能调控的护栏设计方法。通过参数化分析与验证,揭示了防阻块几何形态(如顶角、底角、板厚)对其变形模式与高度补偿能力的直接影响规律,以及立柱预留孔间距、数量与调节范围、经济性的内在关联。这使得护栏设计从经验定性转向性能可预测、参数可优化的科学阶段,为不同工程需求下的护栏适应性设计提供了具体、可操作的技术依据。

(3)验证了该设计在确保碰撞安全等级前提下的高度保持有效性。实车足尺碰撞试验与仿真分析一致表明,在3种标准车型碰撞下,优化后的护栏系统均能有效阻挡并导向车辆,各项安全指标(加速度、速度变化量、护栏变形量)全面满足《评价标准》要求。尤其重要的是,防阻块在碰撞过程中的有序变形不仅没有削弱系统防护能力,反而通过其特有的变形,实时补偿了因立柱弯折造成的高度损失,实现了“安全防护”与“高度维持”两大功能在碰撞瞬时的统一。

(4)方案兼具显著的经济性与施工便捷性,具备良好的工程应用与推广前景。工程实践表明,该方案在路面加铺后无需大规模拆旧建新,仅通过调整安装位置即可恢复设计高度,施工效率提升40%以

(下转第141页)