

广清高速公路A级波形梁护栏加强方案研究

龚帅¹,李璇²,胡学成¹,马晴¹,闫书明¹

(1.北京华路安交通科技有限公司,北京市 100070;2.道路交通安全公安部重点实验室、公安部交通管理科学研究所,江苏 无锡 214151)

摘要: 为了提高广清高速公路连续S弯道护栏安全防护性能,以通过碰撞试验的新型3 mm三波A级波形梁护栏为基础,提出护栏加强方案,建立高精度计算机仿真模型,对加强方案的极限防护能力和不同基础护栏的安全防护能力进行分析。结果表明:护栏加强方案较原护栏对大客车的防护能力由140 kJ提高到230 kJ,提高幅度为64.3%,对大货车防护能力由125 kJ提高到260 kJ,提高幅度为108%,同时规范推荐的四种护栏基础埋置方式均满足评价标准要求。研究成果可有效提高危险路段的安全运营水平,已经在实际工程中应用。

关键词: 波形梁护栏;计算机仿真;碰撞试验;防护能力;基础

中图分类号: U491.5

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)03-0034-05

0 引言

广州(庆丰)—清远(北江)高速公路(简称广清高速)存在连续S弯道路段,车辆行驶经过时容易发生侧滑,属于事故多发路段,若护栏防护性能不足,易导致车辆穿越中分带进入对向车道和穿越路侧冲出路外的事故。连续S弯道路段设置为A级双波梁护栏,该护栏适用于高速公路普通路段,鉴于连续S弯道线形特殊,应对护栏进行有效加强,提高该路段的安全运营水平。

以3 mm三波A级波形梁护栏结构为基础^[1-2],提出广清高速连续S弯道路段波形梁护栏加强方案,建立计算机仿真模型并采用实车足尺碰撞试验验证其可靠性后,对加强方案的防护能力及其多种基础埋置方式的适应性进行分析^[3]。

1 广清高速连续S弯道及其护栏设置

广清高速公路上存在一些事故相对集中的路段,这些路段在扩建后仍可能不利于行车安全,通过深入分析可知,位于北部路段的连续转弯路段和S弯线形组合路段是事故相对多发路段,图1为原连续转弯路段平面图和曲线半径。从图1可以看出,连续转弯路段最小半径为560 m。该路段(连续S弯路段)反向曲线拐点与超高过渡段组合设置难以满足

车辆运行速度行驶要求,当车辆在反向曲线上行驶时,不满足运行速度要求设置的超高,容易形成反超高,车辆侧滑导致事故多发。

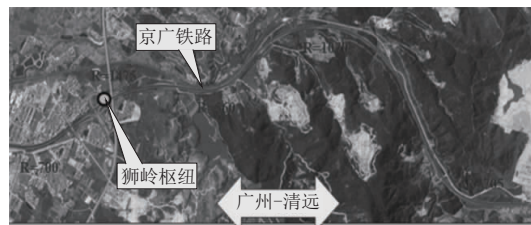


图1 连续转弯路段平面图和曲线半径之实景

在扩建工程中,调整了连续转弯路段半径(将最小曲线半径从560 m调整为700 m),但连续转弯路段半径700 m为临界值,车辆通过此路段易发生事故。现在该路段中央分隔带整体采取双波梁护栏,路侧也多采取这类双波梁护栏,如图2所示。



图2 连续S弯道路段双波梁护栏之实景
双波梁护栏结构数据见表1,构造如图3所示。

2 3 mm三波A级波形梁护栏

2.1 护栏结构

通过以往的研究发现双波形梁护栏高度不足是导致防护大型车效果不佳的主要原因。但是,若整体提高双波梁高度又会出现小型车下穿的状况^[4-5]。基

收稿日期:2023-04-13

基金项目:道路交通安全公安部重点实验室开放课题基金资助(2022ZDSYSKFKT06)

作者简介:龚帅(1989—),男,硕士,工程师,从事交通工程设计工作。

表 1 双波梁护栏结构参数一览表		单位:mm
名称	规格	
双波形梁板	310×85×4	
立柱	Φ140×4.5	
六角形防阻块	196×178×200×4.5	

注:双波形梁板中心距地面高度为600 mm,各结构之间采用螺栓连接。

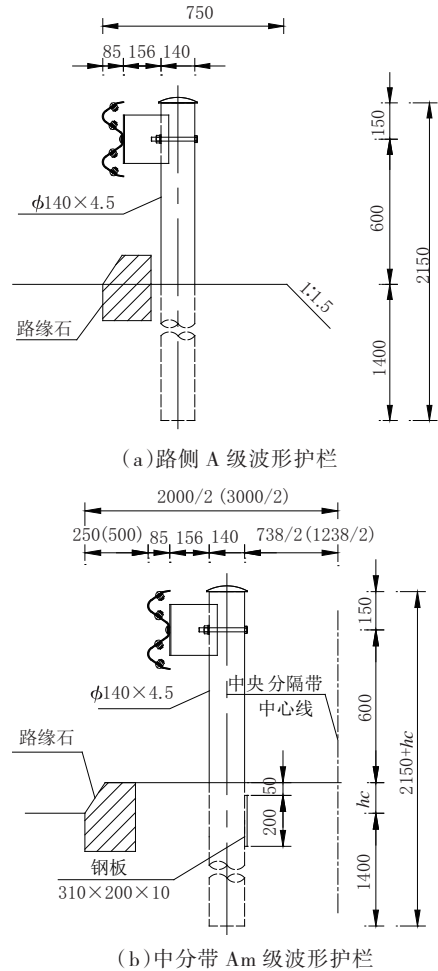


图 3 A 级双波梁护栏构造图(单位:mm)

于此,曾研究得到 3 mm 三波护栏结构设计,参数见表 2,构造图如图 4 所示。

表 2 三波护栏结构参数一览表		单位:mm
名称	规格	
三波波形梁板	506×85×3	
立柱	Φ140×4.5	
六角形防阻块	196×178×400×4.5	

注:三波形梁板中心距地面高度为700 mm,各结构之间采用螺栓连接。

2.2 实车碰撞试验

3 mm 三波 A 级波形梁护栏经过了实车足尺碰撞试验,碰撞过程见表 3。护栏的各项指标均满足评价标准要求,达到 A 级 160 kJ 防护能量,具体指标见表 4。

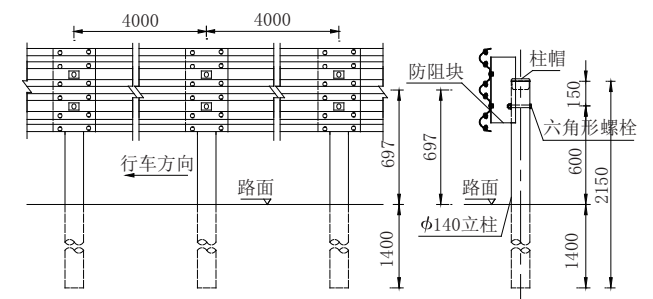


图 4 3 mm 三波 A 级波形梁护栏构造图(单位:mm)

表 3 碰撞护栏过程图一览表	
碰撞车型	碰撞过程
小型客车	
中型客车	
中型货车	

3 仿真模型及验证

护栏和车辆碰撞体系按照上述实车足尺碰撞试验参数创建了仿真模型,并对仿真计算结果和试验结果进行了对照。表 5 从护栏塑性变形角度对模型的可靠性进行了验证^[6-9]。

4 波形梁护栏加强方案

波形梁护栏加强结构方案设计遵循以下原则:由于双波梁护栏加强有可能需要在通车状态下进行,需要施工简洁方便,同时一定要保留原有已打入立柱不动。从经济角度考虑,尽可能采用原护栏结构;从安全角度出发,波形梁护栏加强方案须以碰撞试验为依据,保证其安全防护性能。

双层波形梁护栏结构形式的加强方案见表 6 所列和图 5 所示。

5 加强方案防护能力仿真分析

A 级波形梁护栏和双层波形梁护栏防护大客车和大货车的极限防护能力采取转变碰撞能量的方式进行探索。

图 6 所示为 A 级波形梁护栏实车碰撞试验结果之实景。A 级波形梁护栏不能防护碰撞能量可以达到 160 kJ 的大客车和大货车。因此,需要对碰撞能量在 160 kJ 以下的碰撞环境进行探索。

表 4 新型 A 级波形梁护栏安全评价报告表

评价项目			小客车		大客车		大货车	
			测试结果	是否合格	测试结果	是否合格	测试结果	是否合格
阻挡功能	车辆是否穿越、翻越和骑跨试验护栏		否	合格	否	合格	否	合格
	试验护栏构件及其脱离件是否侵入车辆乘员舱		否	合格	否	合格	否	合格
导向功能	车辆碰撞后是否翻车		否	合格	否	合格	否	合格
	车辆碰撞后的轮迹是否满足导向驶出框要求		满足	合格	满足	合格	满足	合格
缓冲功能	乘员碰撞速度 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	纵向	4.2	合格	—	—	—	—
		横向	5.2	合格	—	—	—	—
	乘员碰撞后加速度 / ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)	纵向	86.2	合格	—	—	—	—
		横向	117.6	合格	—	—	—	—
护栏最大横向动态变形量 D/m			1.00		1.05		1.26	
护栏最大横向动态位移外延值 W/m			1.10		1.15		1.35	
车辆最大动态外倾值 VL/m			—		1.40		1.75	
车辆最大动态外倾当量值 VIn/m			—		1.55		2.73	
评价结论			该护栏安全性能满足 A 级防护等级要求					

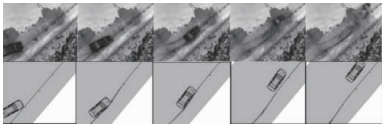
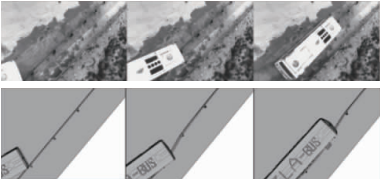
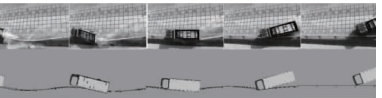
表 5 新型 3 mm 三波梁护栏碰撞过程仿真与试验对比表	
碰撞车型	碰撞过程
小型客车	
中型客车	
中型货车	

表 6 双层波形梁护栏结构一览表		单位: mm
名称	规格	
双波形梁板	310×85×3	
立柱	Φ140×4.5	
六角形防阻块	196×178×200×4.5	

注:双层波形梁护栏下层护栏板中心距地面 60 cm 高,上层护栏板中心距地面 93 cm 高,立柱打桩深度为 1.4 m,各结构之间采用螺栓连接。

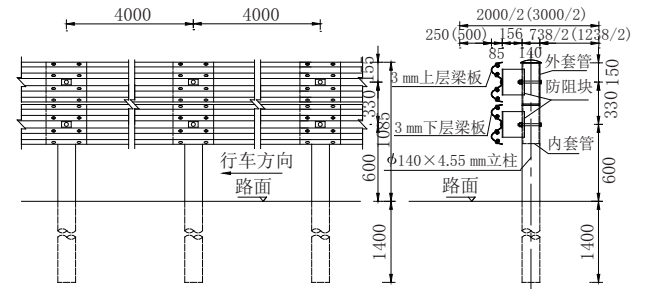


图 5 双层波形梁护栏构造图(单位:mm)



图 6 A 级波形梁护栏实车碰撞试验之实景

依据多年实车碰撞试验、仿真分析和事故调研经验,预计 A 级波形梁护栏能够防护 120 kJ 大客车和大货车。由此确定首先分析的碰撞能量为 120 kJ,然后采用二分法(精度为 5 kJ),或以 5 kJ 为步长继续进行 A 级波形梁护栏防护大客车和大货车的极限能力探索,如图 7 所示。对双层波形梁护栏的极限防护能力也采取相同的方式进行探究。

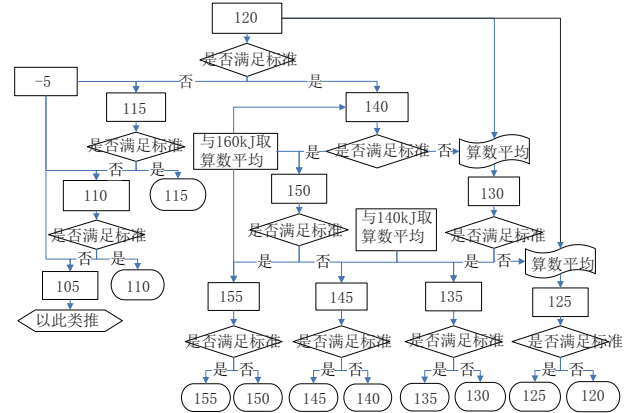


图 7 探索极限能力操作步骤图(单位:kJ)

(1)护栏对 120 kJ 大客车防护能力仿真分析。

通过图 8 的车辆与护栏仿真碰撞过程,车辆平稳导出,说明 A 级波形梁护栏可防护 120 kJ 碰撞能量大客车。

(2)护栏对 140 kJ 大客车防护能力仿真分析。

通过上述(1)分析,护栏可防护大客车的极限碰撞能量应在 $120\text{ kJ}\leq E<160\text{ kJ}$ 之间进行探究。根据



图8 碰撞护栏过程图(一)

二分法进一步对碰撞能量为 $E=(120+160)/2=140\text{ kJ}$ 的大客车分析。

通过图9的车辆与护栏仿真碰撞过程,车辆平稳导出,说明A级波形梁护栏可防护140 kJ大客车。



图9 碰撞护栏过程图(二)

(3)护栏对150 kJ大客车防护能力仿真分析。

通过上述(2)分析,护栏可防护大客车的极限碰撞能量应在 $140\text{ kJ}\leq E<160\text{ kJ}$ 之间进行探究。按照二分法进一步对碰撞能量为 $E=(140+160)/2=150\text{ kJ}$ 的大客车进行分析。

通过图10的车辆与护栏仿真碰撞过程,车辆骑跨护栏,说明A级波形梁护栏不能防护住150 kJ碰撞能量大客车。



图10 碰撞护栏过程图(三)

(4)护栏对145 kJ大客车防护能力仿真分析。

通过上述(3)分析,护栏可防护大客车的极限碰撞能量应在 $140\text{ kJ}\leq E<150\text{ kJ}$ 之间,根据二分法进一步确定大客车碰撞能量为 $E=(140+150)/2=145\text{ kJ}$ 。

通过图11所示的车辆与护栏仿真碰撞过程,可见碰撞能量145 kJ与150 kJ的大客车碰撞护栏过程中车辆行驶姿态相近,均前轮骑跨并停驶在护栏上,说明A级波形梁护栏不能防护住145 kJ碰撞能量大客车。

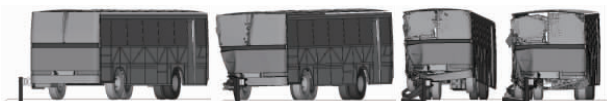


图11 碰撞护栏过程图(四)

综上,可知A级波形梁护栏的极限防护能力为:可有效防护140 kJ碰撞能量的大客车。按照此方法,针对A级波形梁护栏大货车和双层波形梁护栏防护大客车和大货车的极限防护能力进行分析,对结果进行汇总见表7。

表8为根据以上分析结果得到的A级波形梁护栏与双层波形梁护栏的极限防护能力对比以及防护能力提升幅度(与A级波形梁护相比较)。

表7 不同车型碰撞护栏计算结果一览表

护栏类型	碰撞车辆	碰撞能量/kJ	碰撞过程
A级波形梁护栏	中型货车	130	车辆侧翻
		125	车辆驶出
双层波形梁护栏	中型客车	235	车辆骑跨
		230	车辆驶出
	中型货车	265	车辆骑跨
		260	车辆驶出

表8 A级波形护栏与双层波形护栏的极限防护能力对比表

碰撞车型	A级波形梁极限防护能量/kJ	双层波形梁极限防护能量/kJ	更新为双层波形梁后极限防护能量提高幅度/%
中型客车	140	230	64.3
中型货车	125	260	108

6 加强方案基础适应性仿真分析

波形梁护栏立柱埋置方式通常能够划分成4种:打桩式、混凝土基础式、预埋套筒式、预埋地脚螺栓式^[10],如图12所示。当位于正常或小半径路段时,采用打桩式;当其填料或施工范围的地质为石质地段或位于挡土墙路段,打桩施工相对困难或者没有打桩施工的条件时,可采用混凝土基础式;当在小桥、明涵以及通道等地段,其主要结构为钢筋混凝土结构,并没有埋设条件,一般按照实际的施工条件及其他综合情况采用预埋套筒式或预埋地脚螺栓式。因此,基于有限元方法的计算机仿真模拟技术,分析这4种立柱不同埋置方式对A级双层波形梁护栏防护性能的影响,计算结果见表9。

双层波形梁护栏的这四种基础埋置方式均满足安全性能要求,并达到A级防护能力,双层波形梁护栏加强方案可满足上述不同基础工况下的安全防护



图 12 波形梁护栏立柱埋置方式图示

表 9 不同车型碰撞护栏计算结果表

护栏类型	碰撞过程	碰撞结果
打桩式		成功通过 车辆碰撞 分析
混凝土基础式		成功通过 车辆碰撞 分析
预埋套筒式		成功通过 车辆碰撞 分析
预埋地脚螺栓式		成功通过 车辆碰撞 分析

需求。

7 结 论

(1)通过 A 级波形梁护栏加强方案研究,提出—

种双层波形梁护栏结构,根据计算机仿真结果,可将其对大客车防护能力提高 64.3%, 对大货车防护能力提高 108%。其研究成果已成功在广清连续 S 弯道路路段应用,有效提高了该事故多发路段的安全运营能力。

(2)通过分析不同基础护栏的安全防护能力,根据计算机仿真结果,四种基础方式均可满足 A 级安全防护性能需求。为此可根据实际工程工况选择合适的基础方式。

参考文献:

[1] JTG/T D81—2017,公路交通安全设施设计细则[S].
[2] JTG D81—2017,公路交通安全设施设计规范[S].
[3] JTG B05-01—2013,公路护栏安全性能评价标准[S].
[4] 刘航,龚帅,刘思源,等.高速公路旧波形梁护栏改造研[J].公路工程,2020,45(6):173-180.
[5] 闫书明,陈冠雄,刘航.几种改进的波形梁护栏的碰撞分析[J].公路工程,2016,41(1):167-171,201.
[6] 裴大军,张望鹏,邓宝,等.防撞护栏最大动态变形量敏感性分析[J].公路工程,2020,45(2):224-228.
[7] 吕思中,刘甲荣,闫书明.公路 SB 级三波形梁钢护栏安全应用技术[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2020.
[8] 赛志毅.高速公路护栏改造关键技术与应用[M].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
[9] 刘晓波,王新,刘思源,等.基于仿真模拟技术的 SB 级波形梁护栏梁板中心设置高度研究[J].中外公路,2021,41(2):352-356.
[10] 周翔海,陈卫霞,邓宝,等.波形梁护栏立柱承载能力研究[J].中外公路,2021,41(2):356-360.

~~~~~

(上接第 33 页)

堤填土高度多少,一般均应对路基进行处理。结合路堤填土高度,可优先考虑长桩+短桩形式的水泥土搅拌桩复合地基处理模式。

(2)在设定的 3 种工况中,长桩+短桩形式的水泥土搅拌桩复合地基处理效果最好。虽然在路堤填土高度小于 1 m 时的效果一般,但在 4 m 填土高度范围内,随着路堤填土高度的增加,其作用越发明显。

(3)相比普通水泥土搅拌桩,长桩+短桩形式的水泥土搅拌桩复合地基处理方案能够更好地解决路基工后沉降过大的问题。

(4)本项目的长桩+短桩形式的水泥土搅拌桩复

合地基处理方法,可以作为类似工程条件地基处理的一种参考。该方法相比传统水泥土搅拌桩复合地基处理模式拥有相对经济优越性,且有利于缩短工期,具有一定的现实意义和推广价值。

参考文献:

[1] 李云浩,刘方.道路工程施工中的软土地基处理技术[J].工程建设与设计,2022(16):206-208.  
[2] GBT 50783—2012,复合地基技术规范[S].  
[3] 殷爱国,刘明辉.水泥搅拌桩复合地基在郑焦城际铁路软基处理中的应用[J].路基工程,2011(4):159-161,165.  
[4] 刘海源,李致立,李成芳.高压旋喷桩复合地基在软土地基处理中的应用[J].重庆建筑,2022(7):70-72.