

隧道入口护栏防护提升与乘员安全适应性分析

张永强¹, 龚 帅², 甄启令¹, 王 新², 刘威力¹, 胡学成²

(1.江门市银洲湖高速公路有限公司, 广东 江门 529000; 2.北京华路安交通科技有限公司, 北京市 100070)

摘 要: 为提升高速公路隧道入口护栏的安全性能, 采用调研分析、实车足尺碰撞试验和有限元仿真模拟综合研究方法, 了解隧道入口护栏设置现状和安全防护提升需求, 提出一种新型高防护等级金属梁柱式护栏, 并给出其在隧道入口处的合理过渡设计。研究结果显示: 护栏结构安全性能经实车碰撞试验验证, 防护等级达到六(SS)级; 护栏乘员安全适应性能经 1.5 t 小客车 100 km/h 和 33 t 大货车 60 km/h 以 20°角碰撞模拟, 车辆碰撞护栏时假人头部性能指标 HPC 均小于 1 000, 假人胸部压缩指标 THCC 均小于 75 mm, 假人大腿压缩力指标 FFC 均小于 10 kN, 假人各项性能指标均满足要求, 护栏方案对车辆乘员安全适应性能较优, 能够较好地保护车内乘员安全。研究为隧道入口护栏的安全性能提升及实际工程应用提供了有价值的参考。

关键词: 安全适应性能; 隧道入口; 性能提升; 有限元仿真

中图分类号: U491.5+9

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)02-0037-06

0 引 言

在高速公路隧道入口位置, 车辆碰撞隧道洞口事故时有发生, 事故形态多为车辆直接正向撞击隧道壁或车辆撞到护栏后发生侧倾碰撞隧道, 造成严重的事故损害。公路护栏作为保障车辆运行安全的重要被动防护设施, 其合理设置对于隧道入口段的安全运营尤为重要。目前针对隧道入口护栏的安全防护提升问题, 研究人员已经开展了一些研究工作, 并取得了相应技术成果^[1-4], 但是这些研究基本都是通过对护栏的优化加强, 来提升其结构方面的安全可靠性能, 而对于车辆碰撞过程中乘员的保护缺乏深入探讨。基于现阶段隧道入口护栏设置存在的不足, 研究提出隧道入口护栏防护提升方案, 采用碰撞试验验证其结构安全性能后, 利用经过可靠性验证的有限元方法, 通过建立车辆及假人模型对护栏方案的乘员安全适应性能做进一步分析研究, 为护栏方案的实际工程安全应用提供参考。

1 目前隧道入口护栏设置存在不足

现阶段我国高速公路隧道入口护栏仍存在缺失或者设置不合理的情况, 例如隧道入口处路基护栏直接断开无防护, 或隧道入口处护栏未进行合理的

过渡渐变设置, 以及护栏防护设施的防护能力不足等问题(见图 1)。上述问题使公路隧道入口位置存在较大安全隐患, 一旦车辆发生事故, 隧道入口处的隧道壁及检修道极有可能直接成为障碍物, 对事故车辆形成严重绊阻, 给车辆及司乘人员造成严重事故伤害, 见图 2。

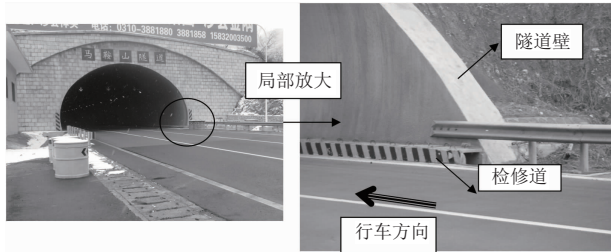


图 1 隧道入口安全防护常用处理方式



图 2 隧道入口车辆碰撞事故

2 隧道入口护栏提升方案及其结构安全性能

2.1 护栏设计方案

针对目前隧道入口护栏设计存在的防护等级低与过渡不合理问题, 虽然现行《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)中给出了在隧道洞口处设置混凝土过渡翼墙的推荐设计, 但其结构属于刚性结构, 且过渡翼墙迎撞面采用直壁式坡面, 即坡面与

收稿日期: 2023-02-20

基金项目: 广东省交通运输厅科技项目(科技-2017-02-009)

作者简介: 张永强(1985—), 男, 学士, 高级工程师, 从事路桥工程建设管理工作。

地面垂直,该设计对于车辆的缓冲防护功能尚有待验证。本研究提出一种金属梁柱式型钢护栏,其为半刚性结构,相比常见梁柱式型钢护栏的矩形横梁设计,该护栏横梁采用了截面更加轻巧的半椭圆形设计,不仅护栏设计防护等级可达到六(SS)级,且结构实现通透美观与轻量化,见图3(a),护栏方案基本结构为:

(1)地面以上护栏有效高度为1.5 m;

(2)金属梁柱结构由“D”形钢管横梁与斜“H”形立柱组成,钢管横梁采用Q345B低合金结构钢材料,呈上下四排分布,其中上部双横梁断面为 $160\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 8\text{ mm}$ (长度 $\times$ 宽度 $\times$ 厚度)^[5-10],下部双横梁断面为 $160\text{ mm} \times 120\text{ mm} \times 4\text{ mm}$,上部与下部的配套横梁内套管断面分别为 $122\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 10\text{ mm}$ 、 $122\text{ mm} \times 100\text{ mm} \times 6\text{ mm}$;

(3)斜H形立柱由Q345B材质钢板焊接而成,立柱翼板与顶部盖板厚度均为12 mm,腹板厚度为10 mm,立柱中心线间距为2 m;

(4)护栏基础采用混凝土独立基础,由钢筋混凝土及钢管桩组成,混凝土独立基础为 $600\text{ mm} \times 400\text{ mm} \times 900\text{ mm}$ (长度 $\times$ 宽度 $\times$ 高度),钢管桩规格为 $\phi 140\text{ mm}$ 外径 $\times 4.5\text{ mm}$ 厚 $\times 1\,150\text{ mm}$ 长,独立基础纵向设置间距为2 m;

(5)立柱通过不低于8.8级的M30脚螺栓与混凝土基础连接;

(6)横梁与立柱之间采用栓接,螺栓型号为10.9级M22。

图3(b)为金属梁柱式护栏结构在隧道入口位置的过渡设计方案。护栏过渡段采用“直线段+渐变段”的组合设计,其中6 m长直线段护栏通过加密立柱间距进行合理地刚度过渡,以减小碰撞过程中由于护栏变形较大造成车辆在隧道洞口绊阻的风险,该段护栏立柱间距为1.5 m;渐变段护栏的外展斜率按照现行设计规范的要求进行设计,取值1:17。

2.2 护栏结构安全性能

护栏结构方案经过实车碰撞试验验证(见图4),各项安全性能指标均满足现行评价标准要求(见表1),安全性能达到了六(SS)级防护等级,且护栏变形值和车辆外倾值均得到较好控制,有利于减小事故车辆碰撞护栏后与隧道壁发生二次碰撞事故,可见护栏防护能力相比目前隧道入口处常规护栏设计大幅提升。

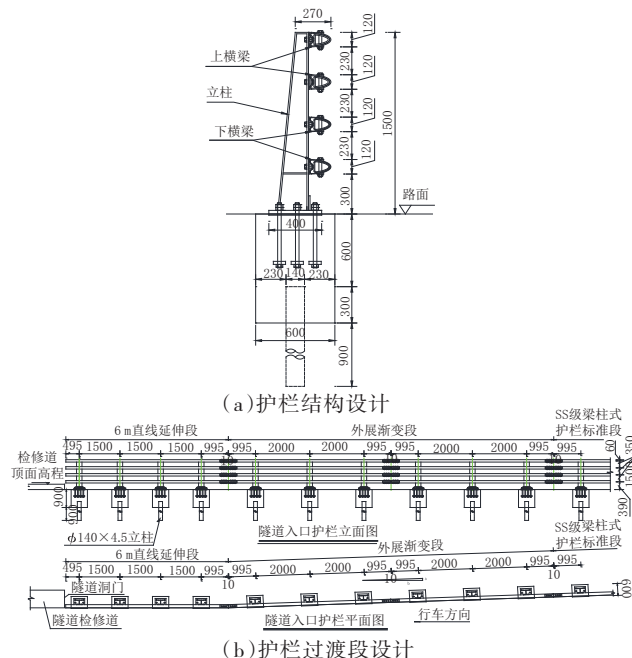


图3 护栏设计方案(单位:mm)



图4 护栏方案实车碰撞试验

3 护栏方案的乘员安全适应性能分析

3.1 仿真建模方法及其可靠性验证

(1)仿真模型建立方法

利用LS-DYNA仿真软件进行建模。由于车辆的车身结构基本为金属板壳构成,主要使用四边形单点积分壳单元划分网格,使用部分三角形单元来保持网格一致性,但三角形单元在单个钣金构件中不超过其单元数的10%;同时,控制四边形单元翘曲度小于 15° ,长宽比小于5,最大角小于 135° ,最小角大于 45° ,雅克比大于0.65,偏斜度小于 45° ,最小特征长度约控制在5 mm。车架各构件采用刚性点焊、梁单元进行连接,车门与车体之间通过铰接点单元连接。车辆悬架系统、转向系统和发动机等作简化处理,采用具有惯性特性或功能特性的质量点或刚体表示。大车和小车的轮胎内部空气压强经测定分别取0.8 MPa和0.3 MPa,采用气囊进行模拟。车辆结构的材料性能参数可通过相应地力学性能试验得到,由于涉及高速碰撞问题,在进行材料参数设定时还需要考虑材料的应变率影响,可以利用Cowper-Symons模型。车内驾驶员采用86 kg重的混合III型50百分位刚体坐姿假人进行模拟(见图5),安全带与假人间的接触用*CONTACT_AU-

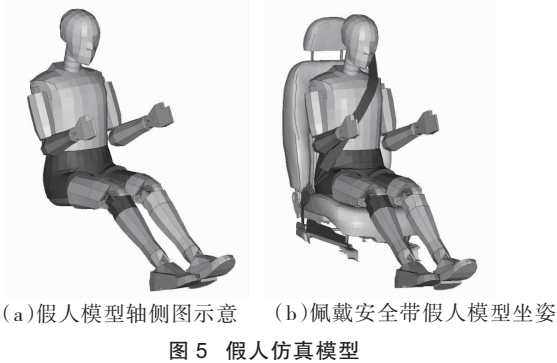
表 1 护栏方案实车碰撞试验结果汇总

碰撞试验检测项目		小客车		大客车		大货车		
		检测结果	是 / 否满足评价指标要求	检测结果	是 / 否满足评价指标要求	检测结果	是 / 否满足评价指标要求	
阻挡功能	车辆是否穿越、翻越和骑跨试验护栏	否	✓	否	✓	否	✓	
	试验护栏构件及其脱离件是否侵入车辆乘员舱	否	✓	否	✓	否	✓	
导向功能	车辆碰撞后是否翻车	否	✓	否	✓	否	✓	
	车辆碰撞后的轮迹是否满足导向驶出框要求	满足	✓	满足	✓	满足	✓	
缓冲功能	乘员碰撞速度 $/(m \cdot s^{-1})$	纵向	5.1	✓	-	-	-	
		横向	8.4	✓	-	-	-	-
	乘员碰撞后加速度 $/(m \cdot s^{-2})$	纵向	37.3	✓	-	-	-	-
		横向	70.6	✓	-	-	-	-
D(护栏最大横向动态变形值)/mm		0		280		140		
W(护栏最大横向动态位移外延值)/mm		520		520		520		
VI(车辆最大动态外倾值)/mm		-		250		280		
VIn(车辆最大动态外倾当量值)/mm		-		380		410		
结论		高速公路隧道入口的高防护等级金属梁柱式护栏的安全性能满足六(SS)防护等级要求						

注:表中“✓”代表指标合格;“-”代表不考虑该项。

TOMATC_SURFACE_ _ TO_ _SURFACE 定义接触界面。护栏墙体优先选用 8 节点六面体单元,柱状五面体单元不超过模型中单元总数的 2%,四面体单元不超过模型中单元总数的 0.1%,控制单元面翘曲度小于 30°,宽高比小于 5,面偏斜度小于 45°,雅克比大于 0.5。对于护栏材料,钢结构采用 Mat24 号材料模拟;混凝土材料采用 CSCM 混凝土模型模拟;钢筋采用 beam 单元模拟,设置为弹塑材料^[11-12]。

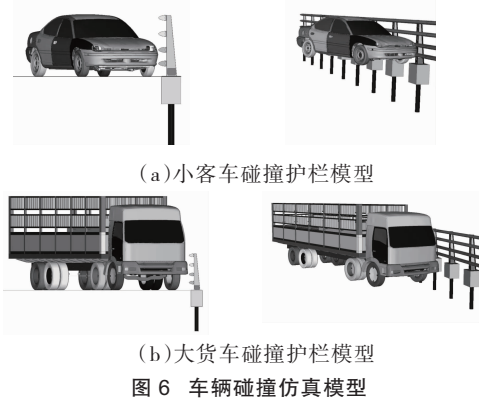
方法,可分别得到小客车与大货车碰撞护栏系统仿真模型,见图 6。



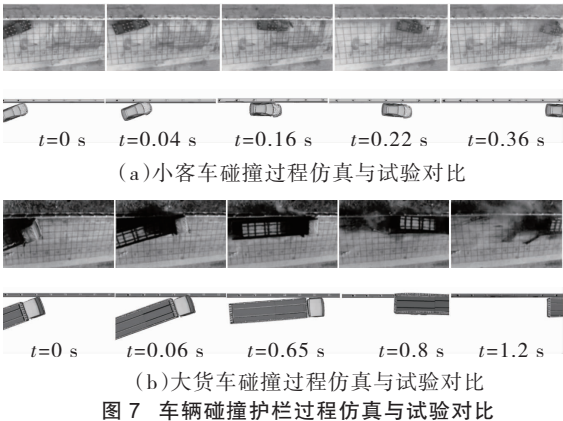
(2)建模方法的可靠性验证

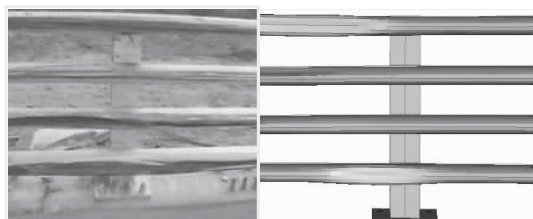
为验证仿真建模方法的可靠性,以上述金属梁柱式护栏的实车碰撞试验为对象,来验证建模方法的准确性和可靠性。试验条件为:小客车整备质量 1.5 t,外观尺寸 4 780 mm×1 600 mm×1 410 mm(长度×宽度×高度),以 100 km/h 速度、20°角度碰撞;整体式大货车整备质量 33 t,外观尺寸为 12 000 mm×2 500 mm×3 450 mm(长度×宽度×高度),以 60 km/h 速度、20°角度撞击护栏。采用前面的仿真模型建立

方法,可分别得到小客车与大货车碰撞护栏系统仿真模型,见图 6。

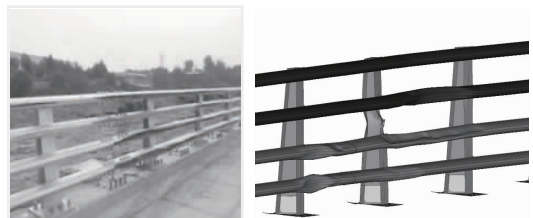


对比分析仿真模拟结果与碰撞试验结果后(见图 7、图 8),可以看出仿真与试验的车辆运行姿态基本吻合,其中车辆驶出角度仿真误差小于 5%;护栏整体残余变形量以及立柱和横梁的破坏模式也基本一致。可见,上述仿真建模方法是可靠的。





(a)小客车碰撞后护栏变形仿真与试验对比



(b)大货车碰撞后护栏变形仿真与试验对比

图8 碰撞后护栏变形仿真与试验对比

3.2 仿真分析

采用经过可靠性验证的建模方法建立隧道入口护栏方案的仿真碰撞系统模型,在驾驶席上设置假人模型,假人总质量为86 kg,按照如表2所示碰撞条件,参考最新《公路护栏安全性能仿真评价技术规程》(T/GDHS 001—2020)所给的仿真评价方法对护栏方案进行乘员安全适应性能分析。

表2 碰撞条件

试验 车型	车辆 质量/t	碰撞速度/ ($\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$)	碰撞角 度/($^{\circ}$)	碰撞位置	假人头部距 地面高度/m
小客车	1.5	100	20	3/4 过渡段位置	1.337
大货车	33	60	20	3/4 过渡段位置	1.541

(1)小客车碰撞仿真分析

图9为小客车仿真模拟碰撞的计算结果,可以看出碰撞护栏后小客车顺利导向,无穿越护栏及明显“跳车”等现象,护栏的构件及其脱离件未见侵入车体乘员舱,碰撞后车辆恢复到正常行驶姿态,没有发生横转或翻车,护栏阻挡功能和导向功能良好。

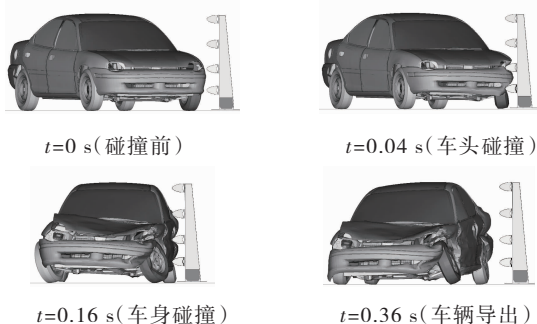


图9 小客车碰撞护栏过程

小客车碰撞护栏时车内假人姿态见图10,乘员在安全带的约束下,运动空间得到了较好的限制。同时分析假人性能指标曲线(见图11):假人头部性能

指标(HPC)为363.44,小于1000;假人胸部压缩指标(ThCC)为3.78 mm,小于75 mm;假人大腿压缩力指标(FFC):左腿1.137 kN,右腿1.747 kN,小于10 kN;满足《公路护栏安全性能仿真评价技术规程》(T/GDHS 001—2020)的评价指标要求,护栏缓冲功能良好。可见隧道入口护栏方案可有效保护乘员安全,护栏方案对小客车乘员安全适应性能较优。

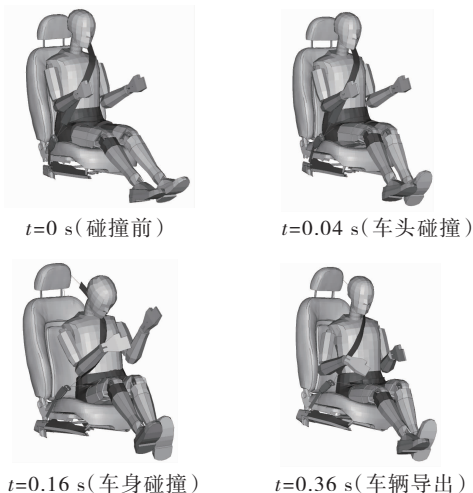


图10 小客车碰撞护栏假人姿态

(2)大货车碰撞仿真分析

图12为大货车仿真模拟碰撞的计算结果,可以看出碰撞过程中大货车车体侧倾不明显,整个过程相对平稳,运行姿态满足评价标准要求,且未见护栏的构件及其脱离件插入车辆乘员舱现象,护栏阻挡功能和导向功能良好。

大货车碰撞隧道入口护栏时车内假人姿态见图13,乘员在安全带的约束下,运动空间得到了较好的限制。同时分析假人性能指标曲线(见图14):假人头部性能指标(HPC)为617.77,小于1000;假人胸部压缩指标(ThCC)为3.31 mm,小于75 mm;假人大腿压缩力指标(FFC):左腿1.804 kN,右腿2.148 kN,小于10 kN;满足《公路护栏安全性能仿真评价技术规程》(T/GDHS 001—2020)对SS级防护等级的要求,护栏缓冲功能良好。可以看出隧道入口护栏可有效保护大型货车乘员安全,护栏方案对大型货车乘员安全适应性能较优。

根据上述仿真碰撞结果可以看出,所提出的隧道入口护栏提升方案可对车辆乘员形成了有效防护,护栏方案的乘员安全适应性能良好,满足最新评价标准要求。

4 结 语

针对高速公路隧道入口护栏安全防护问题,研

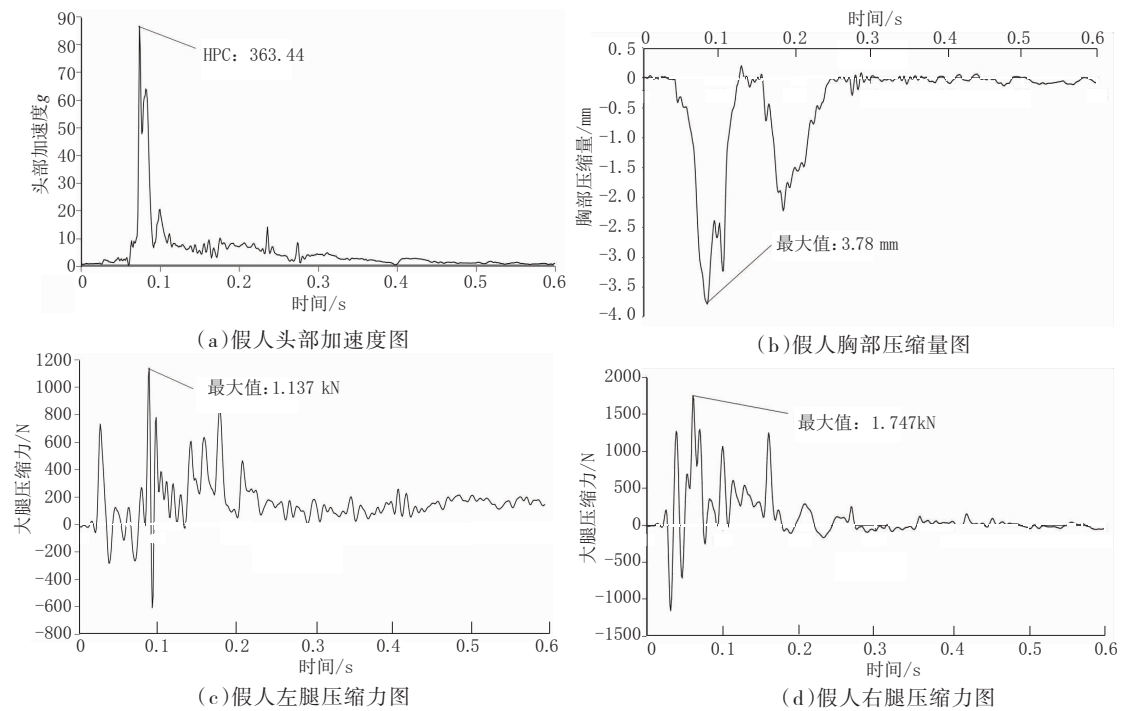


图 11 假人性能指标曲线图

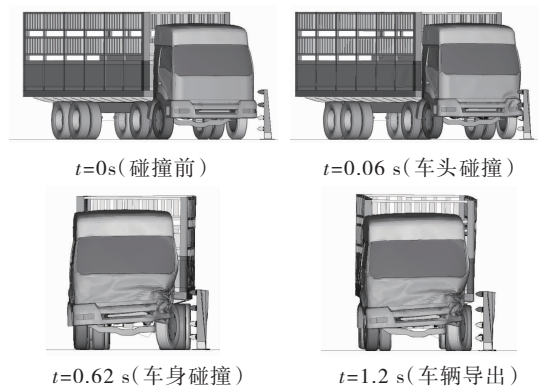


图 12 大货车碰撞护栏过程

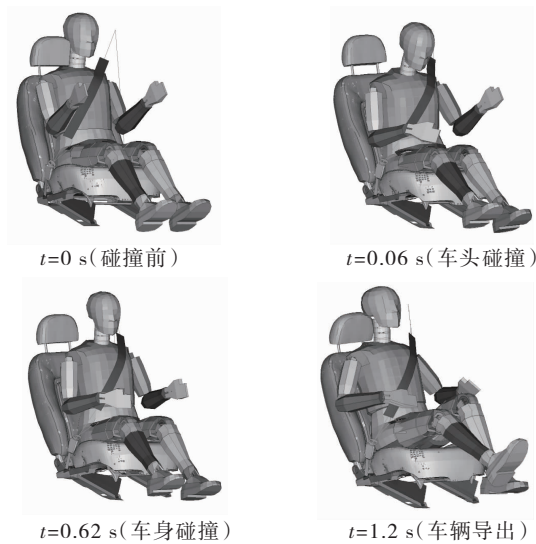


图 13 大货车碰撞护栏假人姿态

究提出一种新型高防护等级金属梁柱式护栏结构，并给出其在隧道入口处的合理过渡设计。护栏方案通过实车足尺碰撞试验验证，其结构安全性能达到

六(SS)级防护等级,较目前隧道入口处常规护栏的防护能力大幅提升。采用经过实车碰撞试验验证的有限元仿真建模方法，建立了配置有假人模型的小型客车模型、大型货车模型及护栏模型,通过仿真模拟碰撞分析，验证了护栏方案的乘员安全适应性能良好,能够较好地保护车内乘员安全。

参考文献:

[1] 栗学铭,杨福宇,全瑞金,等.高速公路隧道入口护栏设计研究[J].广东公路交通,2019,45(5):179-182.

[2] 叶贝贝.基于有限元的隧道入口段护栏安全性仿真研究[D].西安:长安大学,2020.

[3] 邵永刚,赵源.长大下坡路段隧道入口钢护栏结构形式研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(5):65-68.

[4] 贾宁.隧道入口处混凝土护栏设计及安全性能分析[J].公路交通科技,2016,33(5):128-134.

[5] 龚帅,张文豪,刘航,等.既有旧桥梁组合式护栏事故分析与解决方案[J].公路工程,2020,45(6):243-249.

[6] 王爱民,高建雨,汤天明,等.梁柱式型钢护栏与混凝土护栏过渡研究[J].桥梁建设,2020,50(S1):51-56.

[7] 刘明虎,张门哲,亢寒晶,等.桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏安全性分析[J].中外公路,2019,39(3):291-296.

[8] 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.

[9] 裴大军,彭晓彬,龚帅,等.特大桥型钢护栏连接方案研究[J].中外公路,2021,41(2):349-351.

[10] 裴大军,彭晓彬,龚帅,等.缆索承重桥梁专用高等级型钢护栏研发[J].中外公路,2021,41(3):403-406.

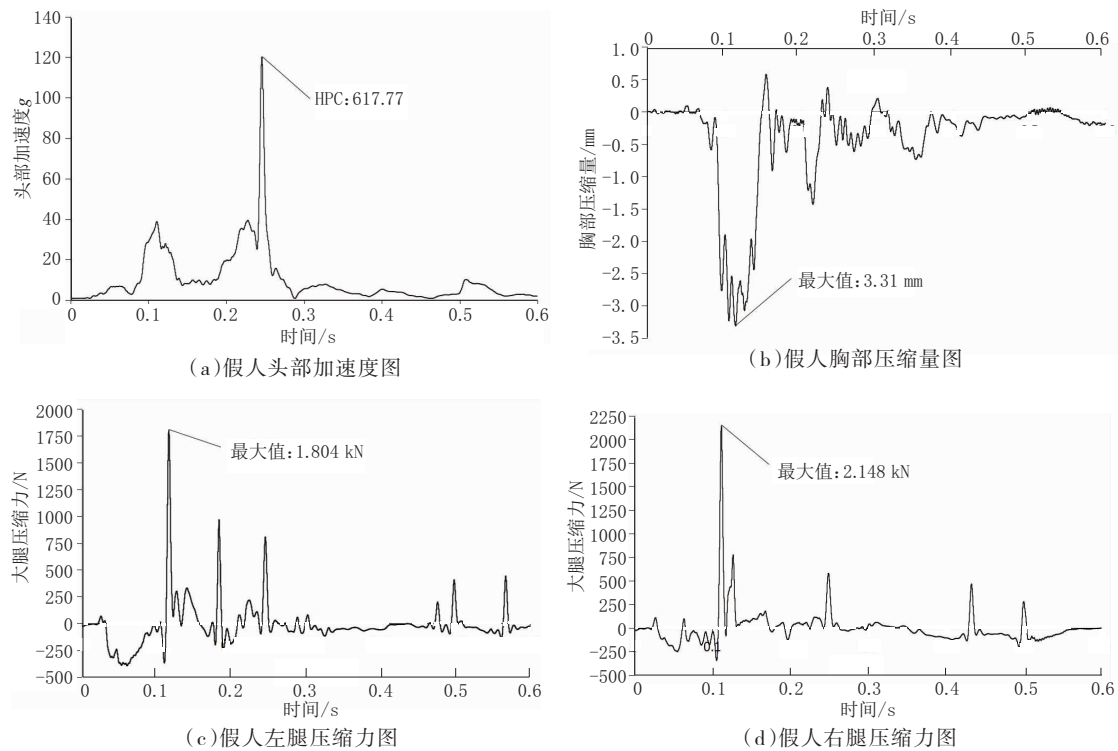


图 14 假人性能指标曲线图

[11] 闫书明,郑斌,李黎龙,等.梁柱式型钢护栏设计优化及安全性能评价[J].公路交通科技,2012,29(1):139-144.

[12] 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.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com