

# 混凝土护栏坡面参数对防护车辆撞击作用的影响

龚帅

(北京华路安交通科技有限公司,北京市 100070)

**摘要:**为研究混凝土护栏坡面参数对其防护车辆撞击作用的影响,建立车辆与护栏仿真模型,并利用实车试验数据验证模型有效性,采用经过验证的仿真模型,分别对不同坡度单坡面混凝土护栏、不同坡面参数组合改进型混凝土护栏以及加强型混凝土护栏阻爬坎功能进行碰撞分析,结果表明:坡度是影响单坡面护栏防护性能的关键参数,坡度偏小或者偏大均不能为车辆提供有效保护,在标准值 $80^\circ$ 参数条件下护栏综合防护性能相对较优;改进型护栏的斜面倾斜角度( $\alpha$ 与 $\beta$ )、竖直方向高度( $a$ 、 $b$ 及 $c$ )以及倾斜面宽度 $s$ 是影响其防护性能的关键参数,在标准改进型坡面参数条件下,即 $\alpha=84^\circ$ 、 $\beta=55^\circ$ 、 $s=12.5$  cm、 $b=18$  cm及 $c=7.5$  cm时,护栏的综合防护性能相对较优;阻爬坎对于改进型护栏防护性能的提升作用不大,但与新泽西护栏组合后,护栏对于防车辆侧翻效果明显。

**关键词:**交通工程;混凝土护栏坡面;有限元方法;防护性能;仿真模型;碰撞

中图分类号:U417.1+2

文献标志码:A

## Influence of Concrete Barrier Slope Parameters on Protective Effect against Vehicle Collision

GONG Shuai

(Beijing Hualuan Traffic Technology Co., Ltd., Beijing 100070, China)

**Abstract:** In order to study the influence of concrete barrier slope parameters on the protective effect against vehicle collision, the vehicle models and concrete barrier models were established. The validity of these models was verified using the real vehicle test data. Then, the collision analysis was conducted on the single-slope concrete barrier with different slopes, improved concrete barrier with different slope parameter combinations, and reinforced concrete barrier with anti-climbing function by using the validated models, respectively. The results show that the slope is the key parameter that affects the protective performance of the single-slope barrier, and vehicles cannot be effectively protected if the slope is too small or too large. The comprehensive protective performance of the barrier is relatively better under the standard parameter value of  $80^\circ$ . The slope angle ( $\alpha$  and  $\beta$ ), vertical height ( $a$ ,  $b$ , and  $c$ ), and slope width ( $s$ ) of the improved concrete barrier are the key parameters affecting its protective performance. The comprehensive protective performance of the improved concrete barrier is relatively better under the condition of the standard slope parameters ( $\alpha=84^\circ$ ,  $\beta=55^\circ$ ,  $s=12.5$  cm,  $b=18$  cm, and  $c=7.5$  cm). The anti-climbing function has little effect on improving the protective performance of the improved concrete barrier. However, the barrier will have an obvious effect on preventing vehicle rollover when combined with the new jersey safety barrier.

**Keywords:** traffic engineering; concrete barrier slope; finite element method; protective performance; simulation model; collision

收稿日期:2023-11-10(修改稿)

基金项目:广东省交通运输厅科技项目(编号:2017-02-009)

作者简介:龚帅,男,硕士,工程师.E-mail:gongshuaizhen@163.com

## 0 引言

混凝土护栏是刚性护栏的主要代表,车辆碰撞后几乎不变形,主要通过坡面使车辆适度爬高或倾斜来增加车辆作用于护栏的时间,以降低碰撞力,从而对事故车辆起到良好缓冲作用,达到有效保护乘员的效果。掌握坡面参数对车辆撞击作用的影响有助于实现混凝土护栏更加安全合理的应用。国内外针对混凝土护栏坡面方面的研究已取得了一些成果。

美国在 20 世纪 70 年代中和 90 年代末曾对混凝土护栏的坡面形式与尺寸参数进行过研究,比较了坡面结构为新泽西型(NJ型)和改进型(F型)混凝土护栏的优缺点,发现第一种坡面车辆碰撞后容易爬升,高速重车碰撞后较容易越过护栏冲向车道或路外,而第二种坡面则比较适用于交通量大、运行速度高、重车比例高的路段;此外,得克萨斯州研发人员还开发了单坡面混凝土护栏,后来由美国加利福尼亚州研发人员对其进行改进,并通过皮卡车和整体式货车对其安全性能进行了测试,结果令人满意;针对这些坡面结构,美国西南研究所还采用 HVOSM 模拟碰撞试验技术,对改变各种参数的坡面进行了对比分析,对坡面参数变化对于护栏防护性能的影响有了更深入了解<sup>[1-3]</sup>。中国在充分吸收国外先进研究成果和经验的同时,结合中国交通流特性,针对混凝土护栏坡面方面亦开展了不少研究。闫书明<sup>[4]</sup>综合运用仿真与试验方法对高度 96 cm 的某单坡面混凝土护栏进行了碰撞分析,验证了该护栏具有 400 kJ 防撞能力,认为通过使车辆爬升和倾斜来吸收车辆动能和增加碰撞缓冲时间是单坡面混凝土护栏有效防护的一个重要机理;龚帅等<sup>[5]</sup>以某 F 型混凝土护栏为例,建立了高精度小客车碰撞护栏有限元模型,针对该护栏坡面参数进行了安全性能影响分析,验证了现行规范中对于 F 型混凝土护栏坡面参数的合理性;邵永刚<sup>[7]</sup>通过实车碰撞试验验证了某加强型坡面混凝土护栏在路面加铺时预留高度的合理性,为公路中央分隔带混凝土护栏的设计提供了依据。

目前,混凝土护栏坡面相关研究大多是基于某单一坡面且参数固定的护栏防护性能验证研究。而实际工程中混凝土护栏在设计、施工等环节,由于景观性特殊设计、路面加铺、施工误差等各种因素,其坡面结构相对于规范标准形式可能会出现参数上的调整变化,

这些变化对护栏的安全防护性能会造成怎样的影响,目前尚缺少系统深入研究,无法为中国混凝土护栏安全合理应用提供基础数据支撑。鉴于此,本文采用中国主流车型和高精度计算机仿真模拟技术,针对混凝土护栏坡面参数变化对防护车辆撞击作用的影响进行系统分析,以期混凝土护栏安全应用提供参考。

## 1 基于有限元方法的仿真模型建立

车辆碰撞护栏为高度非线性动力冲击问题,选择目前在碰撞分析领域应用广泛的有限元模拟软件 LS-DYNA 对车辆碰撞混凝土护栏进行建模和计算<sup>[8-14]</sup>。

### 1.1 车辆模型

护栏的防护性能需要采用小型客车碰撞验证其缓冲功能和导向功能,需要采用大型车碰撞验证其阻挡功能和导向功能。参考中国小型客车和大型客车结构特点,按照《公路护栏安全性能评价标准》(JTJ B05-01—2013)<sup>[15]</sup>中对车辆参数的要求,分别建立小型客车与大型客车有限元仿真模型(图 1),结构参数如表 1 所示,车身结构主要为金属板壳,采用壳单元进行模拟,车身各部分主要采用刚性或可变形单元模拟点焊进行连接,小客车整车模型由大约 4.2 万个单元组成,大客车整车模型由大约 9.6 万个单元组成。小客车与大客车轮胎胎压分别取 0.3 MPa 和 0.8 MPa。采用基于惩罚函数法的 Automatic\_Single\_Surface 方式定义车辆与护栏的接触。

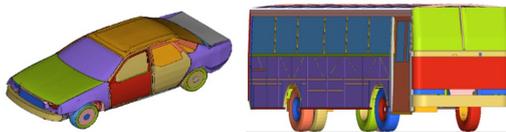


图 1 车辆仿真模型

Figure 1 Vehicle simulation models

### 1.2 护栏模型

针对现行《公路交通安全设施设计细则》(JTJG/T D81—2017,以下简称《设计细则》)<sup>[16]</sup>推荐的单坡型坡面、改进型(F型)坡面和加强型坡面 3 种混凝土护栏进行有限元建模,混凝土护栏长度为 70 m,高度为 1.1 m,顶宽和底宽等其他参数依据设计规范进行确定,然后在上述护栏基础上通过改变坡面参数得到不同坡面变化的护栏模型,为系统开展混凝土护栏坡面参数对车辆碰撞防护性能的影响研究奠定基础。

表 1 车辆模型结构参数

Table 1 Structural parameters of vehicle models

车型	车总质量/t	车辆总长/mm	车辆总宽/mm	前轮轴距/mm	轴距/mm	车轮半径/mm	车辆重心位置/mm		
							距前轴距离	距对称轴距离	距地面距离
小客车	1.5	4 338	1 679	1 440	2 642	303	1 195	8(偏向行车方向左侧)	511
大客车	18	11 910	2 522	2 100	6 010	540	3 938	17(偏向行车方向右侧)	1 298

图 2 为建立的 3 种标准混凝土护栏模型,由于混凝土护栏为刚护栏,采用刚性实体单元建模,其材料属性为 \*MAT\_RIGID 材料,每种混凝土护栏模型共有约 7.7 万个单元。

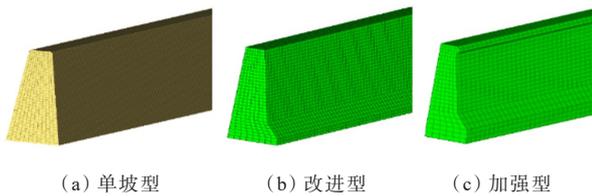


图 2 混凝土护栏模型

Figure 2 Concrete barrier models

## 2 仿真模型的有效性

小型客车仿真模型的有效性已进行过多次系统验证<sup>[5]</sup>,该小型客车模型碰撞护栏(刚性护栏)过程中驶出角度仿真误差仅为 6.1%,车体重心处 X、Y、Z 三个方向的加速度仿真误差分别仅为 6.3%、3.6% 和 5.8%,且车辆变形情况仿真与试验结果也基本一致,验证了该模型的准确性与可靠性。因此,仅对大型

客车碰撞混凝土护栏模型的有效性进行验证。

参考《公路护栏安全性能仿真评价技术规程》(T/GDHS 001—2020)<sup>[17]</sup>的模型验证方法,对大客车碰撞护栏模型进行验证。图 3 为大型客车碰撞混凝土护栏过程仿真与试验对比,可见车辆行驶姿态的仿真与试验结果基本一致,且护栏最大横向动态位移外延值和车辆最大动态外倾值等仿真与试验的对比指标均在允许误差范围(表 2),验证了仿真模型的有效性。



图 3 大型客车碰撞混凝土护栏仿真与试验对比

Figure 3 Comparison between simulation and test results of concrete barrier under bus collision

表 2 大型客车碰撞混凝土护栏仿真与试验指标对比

Table 2 Comparison between simulation and test indexes of concrete barrier under bus collision

对比项	对比指标	单位	结果		允许误差范围	是否一致/是否在允许误差范围
			仿真	试验		
阻挡功能	车辆是否穿越、翻越和骑跨护栏		否	否	—	是
	护栏构件及其脱离碎片是否侵入车辆乘员舱		是	是	—	是
导向功能	车辆碰撞后是否翻车		否	否	—	是
	车辆碰撞后的轮迹是否满足导向驶出框要求		是	是	—	是
其他	碰撞过程中是否有车轮脱落		否	否	—	是
	护栏纵向连接构件是否失效		否	否	—	是
护栏最大横向动态位移外延值	外延值	m	0.48	0.40	$\pm[0.05+0.1 \times (\text{试验值})]$	是
车辆最大动态外倾值	外倾值	m	0.44	0.40	$\pm[0.05+0.1 \times (\text{试验值})]$	是

### 3 不同坡面参数条件下车撞护栏仿真分析

#### 3.1 坡面参数

图4给出了单坡型混凝土护栏、改进型混凝土护栏和加强型混凝土护栏的坡面结构参数示意。单坡面混凝土护栏结构简洁,倾斜角度 $\alpha$ (坡度)是影响其安全防护性能的主要因素;对于改进型混凝土护栏,影响其安全防护性能的坡面参数包括 $\alpha$ 和 $\beta$ 两个斜面倾斜角度, $a$ 、 $b$ 、 $c$ 三个垂直方向高度以及倾斜面宽度 $s$ ,坡面参数相对较为复杂;加强型坡面则是基于改进型坡面在护栏顶部增加了阻爬坎。

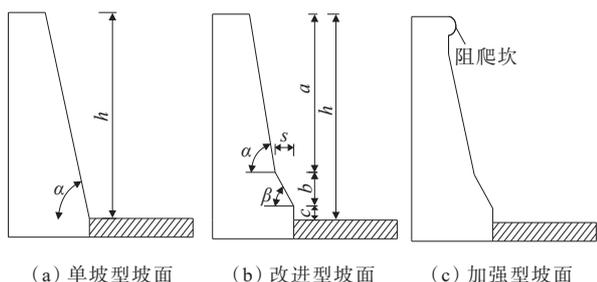


图4 混凝土护栏坡面参数示意

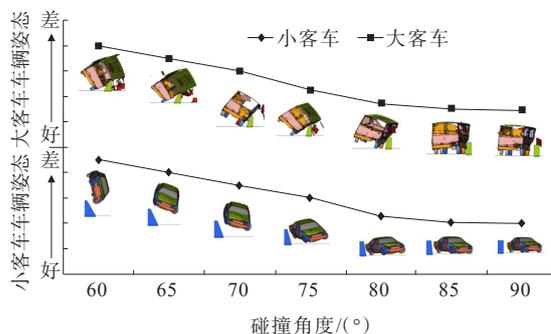
Figure 4 Concrete barrier slope parameters

为分析坡面参数对混凝土护栏防护性能的影响,采用经碰撞试验验证有效的高精度计算机仿真模型,在混凝土护栏有效总高度保持1.1 m不变的情况下,分别对不同坡度单坡面混凝土护栏、不同坡面参数组合改进型混凝土护栏以及加强型混凝土护栏阻爬坎功能进行系统仿真碰撞分析,碰撞条件为小型客车1.5 t、100 km/h碰撞速度、20°碰撞角度,大型客车18 t、80 km/h碰撞速度、20°碰撞角度。

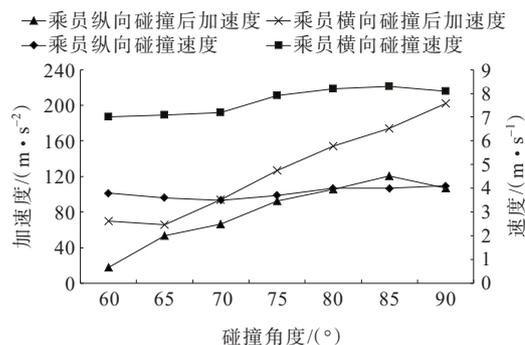
#### 3.2 不同坡面参数条件下车辆碰撞护栏仿真结果

图5为小型客车与大型客车碰撞不同坡度(60°、65°、70°、75°、80°、84°、90°)的单坡面混凝土护栏仿真计算结果,由相同碰撞时刻车辆行驶姿态可以看出:当倾斜角度 $\alpha$ 小于75°时,随着坡度变缓小客车爬升明显,行驶姿态逐渐变差,车辆发生侧翻的风险越来越大;当倾斜角 $\alpha$ 小于80°时,大客车在碰撞单坡面护栏过程中极易发生侧翻。由乘员碰撞速度和乘员碰撞后加速度的仿真计算结果可知:随着坡度增加乘员碰撞速度和乘员碰撞后加速度均呈现逐渐增大的趋势,当坡度达到90°时,横向加速度超过200 m/s<sup>2</sup>,

可能会对车内乘员造成伤害。



(a) 车辆姿态



(b) 缓冲指标

图5 不同坡度单坡面混凝土护栏仿真结果

Figure 5 Simulation results of single-slope concrete barrier with different slopes

表3为改进型混凝土护栏不同坡面参数组合条件下小型客车与大型客车碰撞仿真结果,主要分为以下几类情况:

(1) 对于仅角度 $\alpha$ 发生变化时,在保持 $b=18$  cm、 $s=12.5$  cm、 $\beta=55^\circ$ 及 $c=7.5$ 等标准值参数不变的基础上,随着 $\alpha$ 角减小,小客车因爬升发生翻车的风险增大,大客车因车身严重倾斜发生侧翻的风险也显著增加;而随着 $\alpha$ 角增加,乘员碰撞速度和乘员碰撞后加速度均呈现增大规律,当坡度达到90°时,小客车横向加速度超过200 m/s<sup>2</sup>。

(2) 对于参数 $a$ 、 $b$ 、 $s$ 、 $\beta$ 组合变化时(保持参数 $\alpha$ 与 $c$ 分别取标准值55°和7.5 cm),其中 $\beta$ 角与横向距离 $s$ 联动(参数 $a$ 、 $b$ 值不变)影响分析结果表明:随着 $\beta$ 角减小、 $s$ 值增大,小客车爬上坡面发生跳车现象愈发明显,但跳车现象均在可接受范围,对乘员碰撞速度影响不大,而乘员碰撞后加速度出现先减后增现象,最小值位于 $\beta=50^\circ$ 、 $s=15.1$  cm附近;随着 $\beta$ 越小、 $s$ 越大,大客车越易沿着 $\beta$ 角坡面爬升,且当 $\beta$ 小于50°时

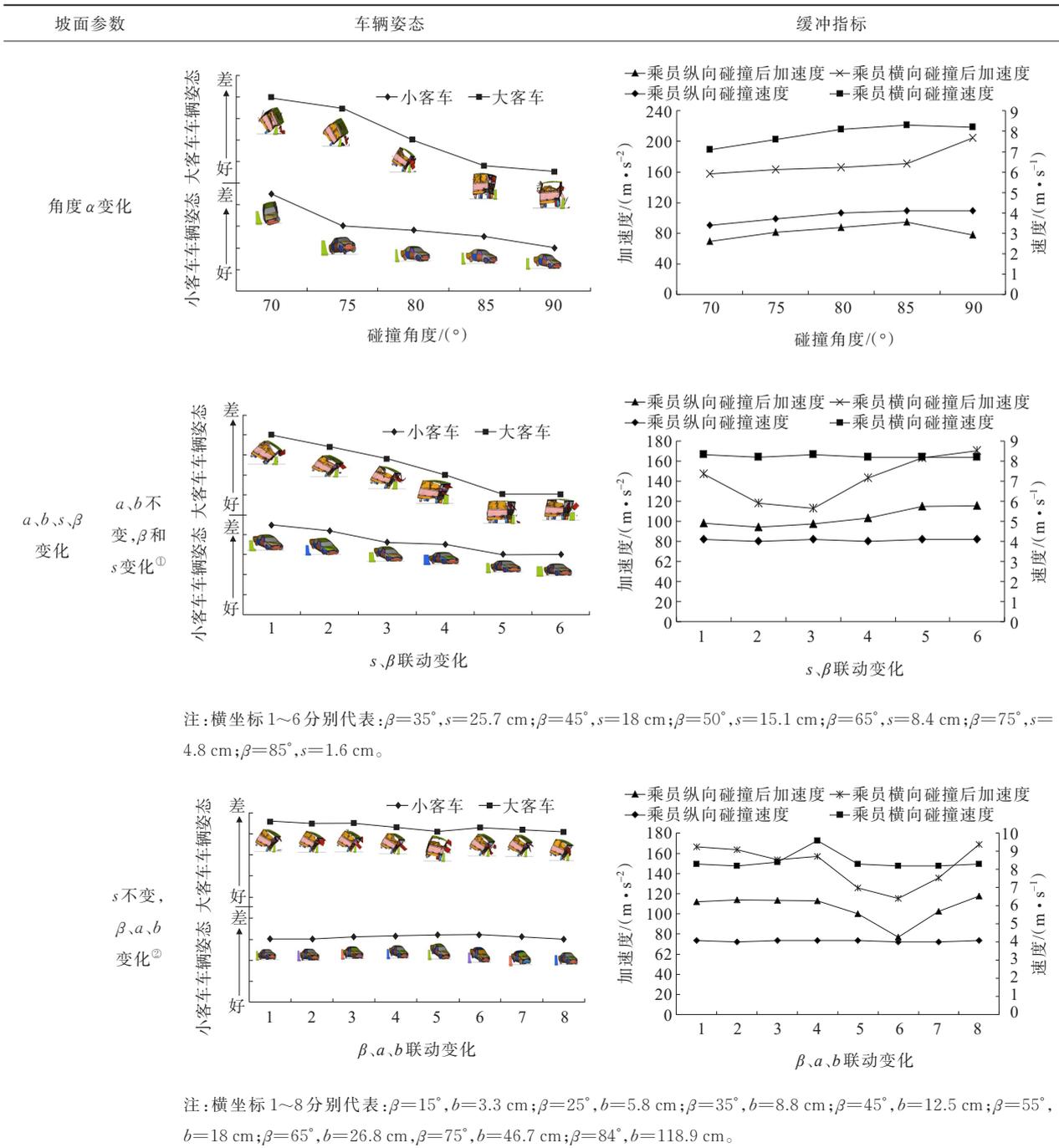
车辆发生侧翻的可能性较大。 $\beta$ 、 $a$ 、 $b$ 值( $s$ 值以及 $a+b=h$ 保持不变)联动影响分析结果表明:随着 $\beta$ 角和 $b$ 值的增大,小客车跳车趋势先增后降,当 $\beta$ 达到 $55^\circ$ 左右时,跳车现象较为明显,但仍在可接受范围内,对乘员碰撞速度影响不大,而乘员碰撞后加速度出现先减后增现象,最小值位于 $\beta=65^\circ$ 、 $b=26.8$  cm附近;随着 $\beta$ 角和 $b$ 值的增大,大客车碰撞护栏姿态较为接近,说明对大客车碰撞过程影响不大。 $s$ 、 $a$ 、 $b$ 值

( $\beta$ 角以及 $a+b=h$ 保持不变)联动影响分析结果表明:随着 $s$ 值和 $b$ 值的增大,小客车与大客车发生翻车的概率均大大增加,而小客车的乘员碰撞速度和乘员碰撞后加速度总体上呈减小趋势。

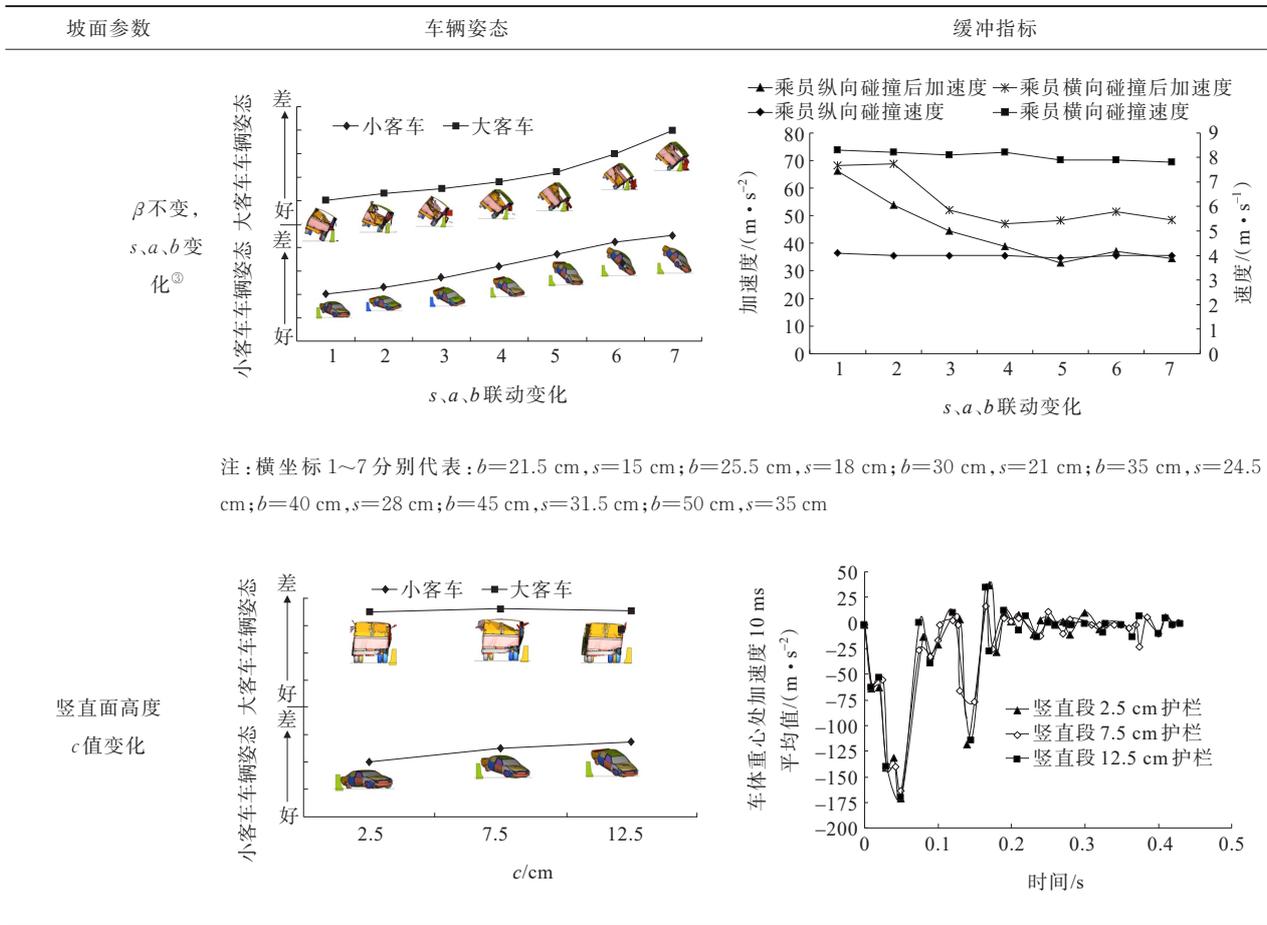
(3) 对于参数 $c$ 发生变化时(其他参数不变),随着 $c$ 值增加,小客车行驶姿态愈来愈不稳定,但对加速度值影响不明显;大客车碰撞过程中侧倾量和驶出角度则逐渐减小。

表 3 改进型混凝土护栏坡面不同参数组合仿真结果

Table 3 Simulation results of improved concrete barrier with different slope parameter combinations



续表 3



注:横坐标 1~7 分别代表: $b=21.5\text{ cm}, s=15\text{ cm}; b=25.5\text{ cm}, s=18\text{ cm}; b=30\text{ cm}, s=21\text{ cm}; b=35\text{ cm}, s=24.5\text{ cm}; b=40\text{ cm}, s=28\text{ cm}; b=45\text{ cm}, s=31.5\text{ cm}; b=50\text{ cm}, s=35\text{ cm}$

注:① 保持参数  $a$  取标准值  $92\text{ cm}$ 、 $b$  取标准值  $18\text{ cm}$ 、 $\alpha$  取标准值  $55^\circ$  以及  $c$  取标准值  $7.5\text{ cm}$  不变,仅参数  $\beta$  与  $s$  变化;② 保持参数  $s$  取标准值  $12.5\text{ cm}$  不变,仅参数  $\beta$ 、 $a$  和  $b$  变化;③ 保持参数  $\beta$  取标准值  $55^\circ$  不变,仅参数  $s$ 、 $a$  和  $b$  变化。

表 4 为小型客车与大型客车分别碰撞有无阻爬坎混凝土护栏(改进型与加强型混凝土护栏)仿真计算结果,可见两种护栏对车辆均能有效防护,且相同时刻车辆碰撞过程行驶姿态十分接近。图 6

为小客车重心位置纵向加速度时程曲线,从图 6 可以看出:车辆碰撞后加速度曲线线形基本一致,验证了增加阻爬坎对于改进型坡面的缓冲功能提升并不明显。

表 4 阻爬坎对车辆姿态影响的仿真结果

Table 4 Simulation results of anti-climbing function on vehicle attitudes

坡面形式	小客车碰撞过程		大客车碰撞过程	
无阻爬坎				
有阻爬坎				

### 4 坡面参数对防护车辆碰撞影响的讨论

对于单坡面混凝土护栏,坡度越缓,小型客车碰撞后越容易爬升导致内翻,大型客车碰撞后越容易外倾导致翻车,影响护栏的阻挡和导向功能;而坡度越陡,小型客车的乘员碰撞速度与乘员碰撞后加速度越大,影响其缓冲功能。因此,单坡面混凝土的坡度需要综合考虑,现行《设计细则》中给出的单坡面标准坡度为 80°,根据仿真结果,该坡面参数条件下单坡面混凝土护栏的综合防护性能相对较优,验证了规范中标准单坡面混凝土护栏坡面参数的合理性。

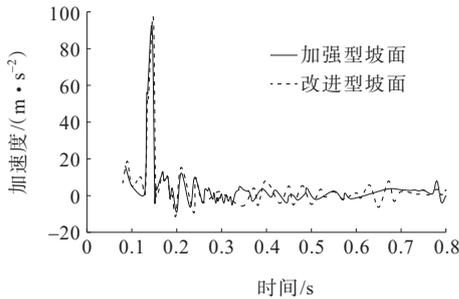


图 6 阻爬坎对乘员碰撞加速度影响的仿真结果

Figure 6 Simulation results of anti-climbing function on collision acceleration of passengers

对于改进型混凝土护栏,影响其防护性能的坡面参数较多,且参数之间会存在关联变化,通过单一

变量分开来研究显然难以实现,因此在仿真分析中对这些坡面参数合理划分后进行了研究,其中倾斜角度  $\alpha$  变化对护栏防护性能的影响与单坡面混凝土护栏坡度变化影响规律类似,同时也验证了标准改进型混凝土护栏  $\alpha$  取值 84° 相对合理。对于参数  $a$ 、 $b$ 、 $s$ 、 $\beta$  组合变化时(其他参数不变):当  $a$ 、 $b$  值不变时, $\beta$  角和  $s$  值联动对小客车影响不大,但对于大客车,在  $\beta < 50^\circ$  时易发生侧翻;对于  $s$  值固定的坡面, $\beta$ 、 $a$ 、 $b$  值联动对小客车及大客车碰撞过程影响均不大;当  $\beta$  保持不变时,随着  $s$  值和  $b$  值的增大,护栏下部斜坡面变长、变缓,更加有利于车轮爬升,于是车辆碰撞时发生翻车的风险增加,这也正是新泽西型( $s$  为 18 cm、 $b$  为 25.5 cm)坡面较改进型( $s$  为 12.5 cm、 $b$  为 18 cm)坡面易导致高速碰撞车辆发生侧翻的主要原因。图 7 为某大型车碰撞新泽西型坡面护栏的试验结果。由图 7 可见:车辆碰撞后发生了侧翻,而相同碰撞条件下采用改进型坡面的碰撞试验结果令人满意,成功通过了多次碰撞试验验证(图 8),从试验角度佐证了上述影响规律,经分析  $s$  值和  $b$  值采用规范中标准值( $s$  为 12.5 cm、 $b$  为 18 cm)更加合理。对于参数  $c$  发生变化时(其他参数不变),在一定范围内( $2.5 \text{ cm} \leq c \leq 12.5 \text{ cm}$ ),随着竖直高度  $c$  的增大,护栏对于小客车的导向功能变差,而对于大客车的阻挡与导向功能更为有利,综合考虑,F 型坡面竖直面高度  $c$  宜采用 7.5 cm。



图 7 某大型车碰撞新泽西型坡面护栏( $s=18 \text{ cm}$ 、 $b=25.5 \text{ cm}$ )试验结果

Figure 7 Test results of truck collision on new jersey safety barrier( $s=18 \text{ cm}$ 、 $b=25.5 \text{ cm}$ )



(a) 某大型车碰撞改进型坡面护栏( $s=12.5 \text{ cm}$ 、 $b=18 \text{ cm}$ )试验(1)



(b) 某大型车碰撞改进型坡面护栏( $s=12.5 \text{ cm}$ 、 $b=18 \text{ cm}$ )试验(2)

图 8 改进型坡面护栏( $s=12.5 \text{ cm}$ 、 $b=18 \text{ cm}$ )通过多次碰撞试验验证

Figure 8 Verification of improved concrete barrier ( $s=12.5 \text{ cm}$  and  $b=18 \text{ cm}$ ) by multiple collision tests

对于加强型混凝土护栏,阻爬坎的主要作用是防止车辆过度爬升而导致侧翻,适合在坡面相对较缓的护栏上使用,如增加阻爬坎的新泽西型护栏可

对车辆形成较好防护(图9),而改进型(F型)坡面由于其基本已消除车辆过度爬升的隐患,因此阻爬坎的作用并不显著。



图9 增加阻爬坎的新泽西护栏防护车辆试验

Figure 9 Protective effect of new jersey safety barrier with anti-climbing function against vehicle collision

## 5 结论

采用有限元仿真模拟对坡面参数对混凝土护栏防护车辆的影响进行分析,得到以下主要结论:

(1) 单坡面混凝土护栏坡面简洁,在护栏高度一定的条件下,单坡面倾斜角(坡度)是影响其安全防护性能的关键参数,角度偏小或者偏大均不能为车辆提供有效保护,在标准值 $80^\circ$ 参数条件下单坡面混凝土护栏的综合防护性能相对较优。

(2) 改进型混凝土护栏坡面参数相对较为复杂,在护栏高度一定的条件下,其坡面的斜面倾斜角度( $\alpha$ 与 $\beta$ )、竖直方向高度( $a$ 、 $b$ 及 $c$ )以及倾斜面宽度 $s$ 是影响其安全防护性能的关键参数。当 $a$ 、 $b$ 值不变时, $\beta$ 角和 $s$ 值联动对小客车影响不大,但对于大客车,在 $\beta < 50^\circ$ 时易发生侧翻;对于 $s$ 值固定的坡面, $\beta$ 、 $a$ 、 $b$ 值联动对小客车及大客车碰撞过程影响均不大;当 $\beta$ 保持不变时,随着 $s$ 值和 $b$ 值的增大,小客车和大客车发生翻车的风险增加;对于仅参数 $c$ 发生变化时(如路面加铺罩面的影响),在一定范围内( $2.5 \text{ cm} \leq c \leq 12.5 \text{ cm}$ ),随着竖直高度 $c$ 的增大,护栏对于小客车的导向功能变差,而对于大客车的阻挡与导向功能更为有利。综合来看,在标准改进型坡面参数条件下,即 $\alpha = 84^\circ$ 、 $\beta = 55^\circ$ 、 $s = 12.5 \text{ cm}$ 、 $b = 18 \text{ cm}$ 及 $c = 7.5 \text{ cm}$ 时,护栏的总体防护性能相对较优。

(3) 阻爬坎对于改进型(F型)混凝土护栏的防护性能影响不大,但阻爬坎与新泽西护栏结合后,对于护栏防车辆侧翻效果明显。

(4) 坡面是混凝土护栏的重要参数,本文研究揭示了坡面参数对混凝土护栏安全性能的影响规律,为设计中选择合适的坡面参数奠定了基础,也为混凝土护栏安全应用及推广提供了重要数据参考。

## 参考文献:

### References:

- [1] MICHIE J D. Recommended procedures for the safety performance evaluation of highway appurtenances[R]. Nchrp Report,1981.
- [2] HIRSCH T J, MARQUIS E, NIXON J F, et al. Crash test and evaluation of a precast concrete Median barrier[J]. Transportation Research Record,1976,594:21-25.
- [3] JEWELL J, ROWHANI P, STOUGHTON R, et al. Vehicular crash tests of a slip-formed, single slope, concrete median barrier with integral concrete glare screen[J]. Highway Design,1997.
- [4] 闫书明. 单坡面混凝土护栏碰撞分析[J]. 北京工业大学学报,2012,38(4):586-589,613.  
YAN Shuming. Impact analysis of single slope concrete barrier[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2012,38(4):586-589,613.

- [5] 龚帅,全瑞金,高建雨,等.F型混凝土护栏坡面参数对安全性的影响[J].广东公路交通,2019,45(5):174-178.  
GONG Shuai,TONG Ruijin,GAO Jianyu,et al.Influence of slope parameters of type F concrete barriers on safety performance[J]. Guangdong Highway Communications, 2019,45(5):174-178.
- [6] 李闯民,王凯,甘新众,等.隔离护栏的碰撞试验条件及其标准研究[J].中外公路,2022,42(3):267-270.  
LI Chuangmin,WANG Kai,GAN Xinzhong,et al.Research on Crash Test Conditions and Standards of Isolation Guardrail[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3):267-270.
- [7] 邵永刚.公路分设型中央分隔带SA级混凝土护栏高度变化对防护性能影响研究[J].公路,2020,65(11):258-262.  
TAI Yonggang. Study on the influence of the height change of road divided median SA level concrete barrier protective performance[J]. Highway, 2020,65(11):258-262.
- [8] JUNG W Y,NOH M H,LEE S Y.Estimation of THIV for car crash against attachable roadside barriers made of the high strength steel[J]. Applied Mechanics and Materials, 2015,751:222-227.
- [9] ASADOLLAHI PAJOUH M,JULIN R D,STOLLE C S,et al.Rail height effects on safety performance of midwest guardrail system[J]. Traffic Injury Prevention, 2018, 19(2): 219-224.
- [10] WEI Z,ROBBERSMYR K G,KARIMI H R.Data-based modeling and estimation of vehicle crash processes in frontal fixed-barrier crashes[J]. Journal of the Franklin Institute, 2017,354(12):4896-4912.
- [11] 汪志勇,甘树兵,王胜.SAm级中央分隔带波形梁新型护栏碰撞研究[J].中外公路,2023,43(5):267-272.  
WANG Zhiyong, GAN Shubing, WANG Sheng. Crash study of new type of guardrail with wave girders in central median of sam class[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2023, 43(5):267-272.
- [12] 周劲宇,唐俊义,黄靖云.一种新型装配式桥梁人-车隔离防撞护栏研究[J].中外公路,2022,42(3):254-258.  
ZHOU Jinyu,TANG Junyi,HUANG Jingyun.Research on a new type of prefabricated bridge human-vehicle isolation anti-collision guardrail[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2022, 42(3):254-258.
- [14] KOVAR J,SHEIKH N,BLIGH R,et al.Development and testing of structurally independent foundations for high-speed containment concrete barrier[J]. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board, 2021, 2675(4):297-307.
- [14] SENNAH K, MOSTAFA A. Performance of a developed TL-5 concrete bridge barrier reinforced with GFRP hooked bars: Vehicle crash testing[J]. Journal of Bridge Engineering, 2018, 23(2):04017139.
- [15] 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 SHD Testing Center Official Web.The Evaluation Specification for way Safety Barriers: JTG B05-01—2013 [S]. Beijing: China Communications Press, 2013.
- [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 Guideline for Highway Safety Facilities: JTG/T D81—2017[S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2017.
- [17] 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.