

# 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

刘晓波<sup>1</sup>, 王新<sup>2\*</sup>, 刘思源<sup>2</sup>, 龚帅<sup>2</sup>, 亢寒晶<sup>2</sup>, 马晴<sup>2</sup>

(1. 湖北省交通运输厅工程质量监督局, 湖北 武汉 430014; 2. 北京华路安交通科技有限公司)

**摘要:**由于实际工程中波形梁护栏梁板中心高度区别于设计标准值的现象时有发生,其  
对护栏的安全防护性能将带来不同程度的影响。为了护栏的合理使用和公路的安全运营,基  
于广泛应用的SB级波形梁护栏规范推荐结构,开展了实车足尺碰撞试验验证其安全可靠  
性,并采用高精度计算机仿真模拟技术手段,对规范规定的护栏梁板中心高度允许误差值±  
20 mm进行了分析,验证其合理性;且运用二分法探索研究了护栏梁板中心高度的设置区间  
为617~777 mm,同时结合相关仿真碰撞数据分析得到护栏有效高度在一定范围内越低,对  
小型车辆防护效果越有利,但对大型车辆阻挡性能越不利,护栏有效高度在一定范围内越高,  
对大型车辆防护效果越有利,但对小型车辆缓冲及导向性能越不利的结论。

**关键词:**SB级波形梁护栏;梁板中心高度;实车足尺碰撞试验;计算机仿真;设置区间

波形梁护栏属于梁柱式结构,波形梁板为拦截失  
控车辆的重要构件,根据大量事故调查和相关研究经  
验,梁板中心高度(即波形梁板中心距路面的高度)是  
影响波形梁护栏防护能力的重要参数,合理的梁板中  
心高度可使护栏发挥良好的安全防护功能,降低事故  
严重程度;反之,不合理的梁板中心高度可能导致车辆  
穿越、翻越、骑跨或下穿护栏的严重事故。

JTG/T D81-2017《公路交通安全设施设计细  
则》中给出了波形梁护栏推荐结构形式和梁板中心高  
度标准值(如A级波形梁护栏梁板中心高度为600  
mm,SB级波形梁护栏梁板中心高度为697 mm)。但  
在实际工程中,部分波形梁护栏梁板中心高度与标准  
值存在一定差异,主要体现在3个方面:①由于施工  
标高误差导致护栏梁板中心高度不足或过高;②由于  
路面养护罩面或大修加铺将波形梁护栏路面以上部分  
立柱结构埋入路面以下,导致护栏梁板中心高度明显  
不足;③由于施工养护单位提前考虑到后期路面加铺  
及路面沉降等情况,为了满足路面加铺后护栏高度依  
旧符合规范要求,减少更换护栏,节省投资,预先增加  
了护栏梁板中心高度。除此之外,还存在因路面沉降  
等客观原因导致护栏梁板中心高度区别于设计高度的  
情况。针对上述情况,需要了解波形梁护栏梁板中心

高度的变化对护栏安全防护性能影响程度到底有多  
大,为此,该文以广泛应用的SB级波形梁护栏规范推  
荐结构为研究对象,对其梁板中心高度的设置区间(即  
梁板中心高度下限值和上限值)进行研究,为公路护栏  
的合理设计与安全使用提供依据。

## 1 标准梁板中心高度的护栏防护性能 与仿真可靠性验证

基于规范推荐的SB级波形梁护栏结构,梁板中  
心高度标准值为697 mm,修建了试验护栏样品、建立  
了护栏仿真模型,并按照JTG B05-01-2013《公路护  
栏安全性能评价标准》中规定的SB级护栏标准碰撞  
条件,采用小型客车、中型客车、大型货车进行了实车  
足尺碰撞试验和仿真模拟碰撞分析。表1为SB级波  
形梁护栏标准碰撞条件,图1为标准梁板中心高度的  
SB级波形梁护栏试验样品和仿真模型。

通过试验验证和仿真分析,可知车辆没有穿越、翻  
越、骑跨和下穿护栏的现象,碰撞后车辆恢复到正常行  
驶姿态,标准梁板中心高度的SB级波形梁护栏具备  
良好的阻挡、缓冲、导向功能,各项指标均满足JTG  
B05-01-2013《公路护栏安全性能评价标准》要求,

收稿日期:2020-03-12

作者简介:刘晓波,男,大学本科,高级工程师。E-mail:993593892@qq.com

\* 通信作者:王新,女,大学本科,工程师。E-mail:702312123@qq.com

表 1 SB 级护栏碰撞条件

碰撞车型	车辆总质量/ t	碰撞速度/ (km·h <sup>-1</sup> )	碰撞角度/ (°)
小型客车	1.5	100	20
中型客车	10.0	80	20
大型货车	18.0	60	20

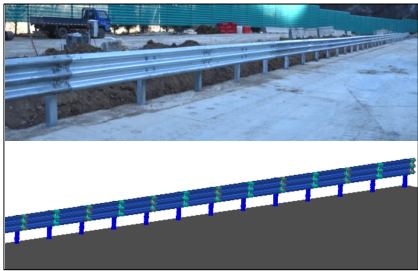


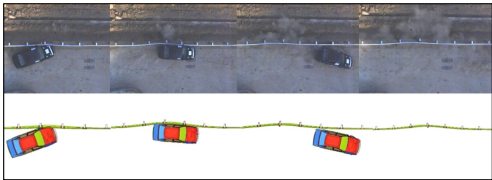
图 1 标准梁板中心高度的 SB 级波形梁护栏  
试验样品与仿真模型

进一步验证了规范推荐结构是安全可靠的。与此同时,从试验和仿真结果对比来看,车辆碰撞护栏过程中的行驶姿态和运行轨迹基本一致(图 2),且护栏整体变形情况亦十分相似(图 3),以小型客车和中型客车碰撞后护栏最大横向动态变形值为例,试验数据分别为 0.5 和 1.25 m、仿真数据分别为 0.532 和 1.351 m,误差分别为 6%和 7.5%,精度较高,说明采用计算机仿真模拟的方法是可靠的,为探索研究 SB 级波形梁护栏梁板中心高度设置区间提供了技术支持。

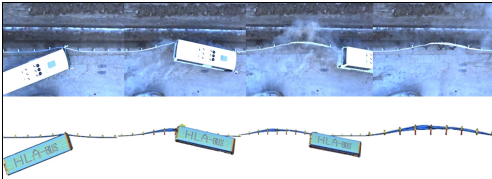
2 护栏梁板中心高度变化影响分析

为更直观地了解护栏梁板中心高度对其防护性能的影响,在 SB 级波形梁护栏标准梁板中心高度 697 mm 的基础上分别降低 100 mm 和提升 100 mm,进行标准碰撞条件下的仿真碰撞分析(图 4)。由图 4 可知:当护栏梁板中心高度降低 100 mm,梁板中心高度为 597 mm 时,可有效防护小型客车,但对大型车辆防护效果不佳,即中型客车发生骑跨护栏现象,未顺利驶出;当护栏梁板中心高度提升 100 mm,梁板中心高度为 797 mm 时,护栏对大型车辆可有效防护,但小型客车在立柱位置绊阻并发生车体横转。

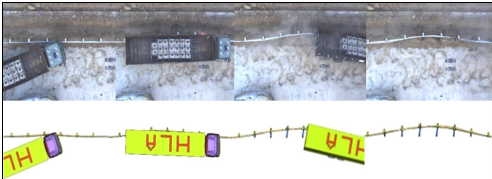
由上可知:梁板中心高度降低或提升 100 mm 对 SB 级波形梁护栏的安全防护性能产生了较大影响,并结合以往研究经验,初步分析认为,护栏梁板中心高度降低对大型车辆安全防护较为不利,而护栏梁板中心高度提升则对小型车辆安全防护较为不利。



(a) 小型客车



(b) 中型客车



(c) 大型货车

图 2 标准梁板高度的 SB 级波形梁护栏车辆运行  
轨迹仿真与试验对比



(a) 小型客车

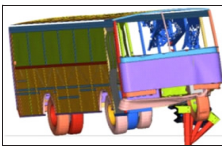
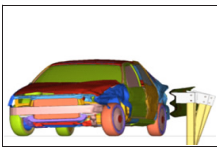
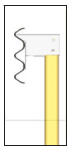


(b) 中型客车

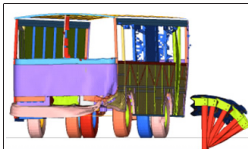
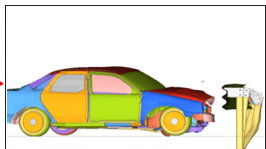
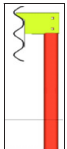


(c) 大型货车

图 3 标准梁板高度的 SB 级波形梁护栏变形试验与仿真对比



(a) 梁板中心有效高度降低 100 mm(597 mm)



(b) 梁板中心有效高度提升 100 mm(797 mm)

图 4 梁板中心高度大幅调整的 SB 级波形梁  
护栏仿真碰撞结果

3 规范规定的护栏梁板中心高度误差  
对防护性能影响分析

第一册 土建工程》中第 11.4.2 条对波形梁护栏梁板中心高度的实测检查进行了规定,即采用尺寸检查方法,按照每 1 km 每侧测 5 处的频率对实际工程中波形梁钢护栏梁板中心高度进行测量,允许偏差为  $\pm 20$  mm。说明公路上应用的波形梁护栏梁板中心高度存在该允许偏差的情况可能较为广泛,故在探索 SB 级波形梁护栏梁板中心高度设置区间前,需先分析规范规定的允许偏差限值( $\pm 20$  mm)对护栏防护性能的影响情况。

采用计算机仿真技术,建立梁板中心高度降低 20 mm(677 mm)的仿真模型,按照 SB 级护栏标准碰撞条件进行仿真碰撞分析(图 5)。

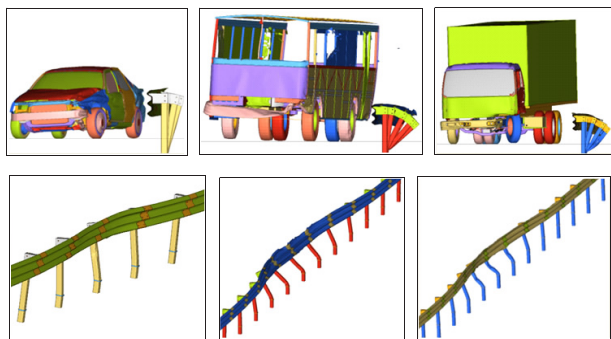


图 5 规范规定护栏梁板中心高度最小误差限值的仿真碰撞结果

由图 5 可见:车辆均平稳驶出,没有穿越、翻越、骑跨、下穿护栏现象,碰撞后车辆恢复到正常行驶姿态,阻挡和导向功能良好;小型客车的乘员碰撞后加速度分别为纵向  $38.6 \text{ m/s}^2$ 、横向  $86.6 \text{ m/s}^2$ ,均小于  $200 \text{ m/s}^2$ ,乘员碰撞速度分别为纵向  $4.2 \text{ m/s}$ 、横向  $6.4 \text{ m/s}$ ,均小于  $12 \text{ m/s}$ ,缓冲功能良好;同时,小型客车碰撞后护栏最大横向动态变形值  $D$  为  $0.489 \text{ m}$ 、最大横向动态位移外延值  $W$  为  $0.754 \text{ m}$ ,中型客车碰撞后护栏最大横向动态变形值  $D$  为  $1.115 \text{ m}$ 、最大横向动态位移外延值  $W$  为  $1.238 \text{ m}$ 、车辆最大动态外倾值  $VI$  为  $1.345 \text{ m}$ 、最大动态外倾当量值  $VI_n$  为  $1.442 \text{ m}$ ,大型货车碰撞后护栏最大横向动态变形值  $D$  为  $0.929 \text{ m}$ 、最大横向动态位移外延值  $W$  为  $1.216 \text{ m}$ 、车辆最大动态外倾值  $VI$  为  $1.630 \text{ m}$ 、最大动态外倾当量值  $VI_n$  为  $1.688 \text{ m}$ 。

图 6 为梁板中心高度提升 20 mm(717 mm)的 SB 级波形梁护栏仿真碰撞结果。

由图 6 可见:车辆均平稳驶出,未发生穿越、翻越、骑跨、下穿护栏现象,且碰撞后车辆恢复到正常行驶姿

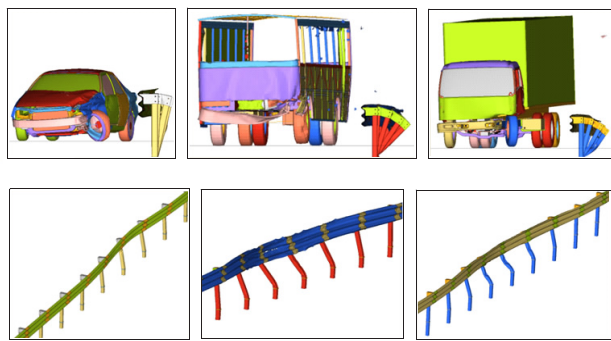


图 6 规范规定护栏梁板中心高度最大误差限值的仿真碰撞结果

态,阻挡和导向功能良好;小型客车的乘员碰撞后加速度为纵向  $83.8 \text{ m/s}^2$ 、横向  $117.9 \text{ m/s}^2$ ,均小于  $200 \text{ m/s}^2$ ,乘员碰撞速度为纵向  $5.9 \text{ m/s}$ 、横向  $5.4 \text{ m/s}$ ,均小于  $12 \text{ m/s}$ ,缓冲性能良好;同时,小型客车碰撞后护栏最大横向动态变形值  $D$  为  $0.485 \text{ m}$ 、护栏最大横向动态位移外延值  $W$  为  $0.737 \text{ m}$ ,中型客车碰撞后护栏最大横向动态变形值  $D$  为  $0.989 \text{ m}$ 、最大横向动态位移外延值  $W$  为  $1.219 \text{ m}$ 、车辆最大动态外倾值  $VI$  为  $1.209 \text{ m}$ 、最大动态外倾当量值  $VI_n$  为  $1.288 \text{ m}$ ,大型货车碰撞后护栏最大横向动态变形值  $D$  为  $0.920 \text{ m}$ 、最大横向动态位移外延值  $W$  为  $1.223 \text{ m}$ 、车辆最大动态外倾值  $VI$  为  $1.623 \text{ m}$ 、最大动态外倾当量值  $VI_n$  为  $1.689 \text{ m}$ 。

由上可知:SB 级波形梁护栏有效高度降低 20 mm 和提升 20 mm 后,防护能力仍可达到 SB 级,说明规范对波形梁护栏允许偏差值  $\pm 20$  mm 的规定合理。

## 4 护栏梁板中心高度设置区间探索

基于前述研究与分析,采用大型车辆(中型客车和大型货车)作为碰撞车型对护栏梁板中心高度进行下限值探索,采用小型客车对护栏梁板中心高度进行上限值探索,且为提高研究效率,运用二分法(精度为 10 mm)开展多次仿真碰撞分析,从而得到 SB 级波形梁护栏梁板中心高度的设置区间。

### 4.1 护栏梁板中心高度下限值探索

由于梁板中心高度降低至 597 mm 的护栏防护能力不达标,降低至 677 mm 的护栏则符合要求,说明 SB 级波形梁护栏梁板中心高度下限值应为 597~677 mm,根据二分法确定分析的护栏梁板中心高度为  $H = (597 + 677) / 2 = 637 \text{ mm}$ ,经仿真碰撞分析,显示护



栏可对中型客车和大型货车进行有效防护;护栏梁板中心高度下限值应为 597~637 mm, $H=(597+637)/2=617$  mm,护栏防护性能仍满足要求;护栏梁板中心下限值应为 597~617 mm, $H=(597+617)/2=607$  mm,中型客车出现骑跨现象,护栏防护能力达不到 SB 级。因此,SB 级波形梁护栏梁板中心高度下限值应为 617 mm,如图 7 所示。

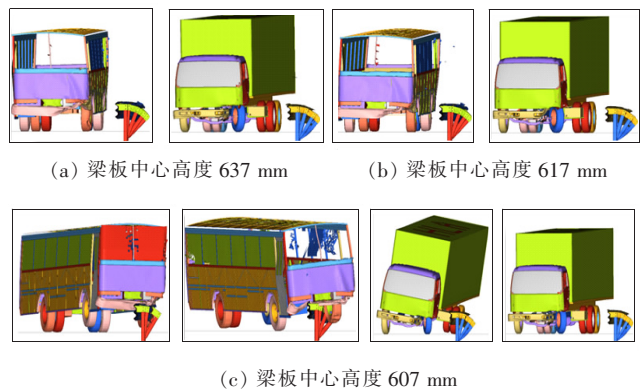


图 7 梁板中心高度下限值探索仿真结果

将 SB 级波形梁护栏梁板中心高度降低的仿真评价结果进行汇总(表 2)。

表 2 降低护栏梁板中心高度仿真评价结果

梁板中心高度/mm	阻挡功能	导向功能	中型客车护栏变形/m	大型货车护栏变形/m	是否满足评价标准
677	良好	良好	1.115	0.929	是
657	良好	良好	0.996	0.929	是
637	良好	良好	0.954	0.919	是
617	良好	良好	0.920	0.930	是
607	车辆骑跨护栏	车辆骑跨护栏	0.899	0.952	否
597	车辆骑跨护栏	车辆骑跨护栏	0.869	0.913	否

由表 2 可以看出:随着梁板中心高度的降低,护栏对大型车辆(尤其是中型客车)的防护性能、导向性能逐渐降低,直至丧失。车辆碰撞过程中发生的形态大体包括两种,即梁板中心高度降至 617~677 mm 时,护栏有效阻挡车辆驶出,且将车辆顺利导回车道;梁板中心高度降至 607 mm 和 597 mm 时,车辆骑跨护栏,且骑着护栏滑行一段距离,阻挡和导向效果均不达标。

4.2 护栏梁板中心高度上限值探索

由于梁板中心高度提高至 797 mm 的护栏防护能

力不达标,提升至 717 mm 的护栏则符合要求,说明 SB 级波形梁护栏梁板中心高度上限值应为 717~797 mm,根据二分法确定分析的护栏梁板中心高度为  $H=(717+797)/2=757$  mm,经仿真碰撞分析,显示护栏可对小型客车进行有效防护;护栏梁板中心高度上限值应为 757~797 mm, $H=(757+797)/2=777$  mm,护栏防护性能仍满足要求;护栏梁板中心上限值应为 777~797 mm, $H=(777+797)/2=787$  mm,小型客车发生车体横转,未能顺利驶出,护栏防护性能不佳。因此,SB 级波形梁护栏梁板中心高度上限值应为 777 mm,如图 8 所示。

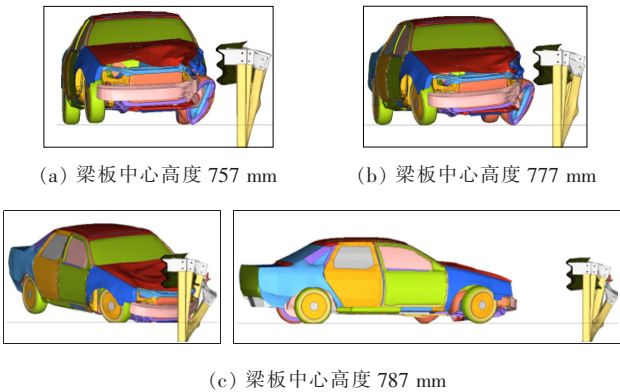


图 8 梁板中心高度上限值探索仿真结果

将 SB 级波形梁护栏梁板中心高度提升的仿真评价结果进行汇总(表 3)。

表 3 提升护栏梁板中心高度仿真评价结果

梁板中心高度/mm	阻挡功能	导向功能	碰撞速度最大值/(m·s <sup>-1</sup> )	乘员碰撞后加速度最大值/(m·s <sup>-2</sup> )	是否满足评价标准
717	良好	良好	5.9	117.9	是
737	良好	良好	6.9	111.1	是
757	良好	良好	7.2	140.8	是
777	良好	良好	7.6	170.9	是
787	车体横转	车体横转	8.1	192.2	否
797	车体横转	车体横转	8.6	196.6	否

由表 3 可知:随着梁板中心高度的提升,护栏对小型车辆缓冲及导向性能越不利,小型客车碰撞过程中发生的形态大体包括两种:梁板中心高度升至 717~777 mm 时,护栏可有效阻挡车辆下穿或驶出,且将车辆顺利导回车道;梁板中心高度升至 787 mm 和 797