DOI:10.14048/j.issn.1671－2579.2019.03.060

桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏安全性分析

刘明虎[1]，张门哲[2]，亢寒晶[3]，唐守峰[2]，马晴[3]
（1.中交公路规划设计院有限公司，北京市 100088；2.湖北省交通投资集团有限公司；3.北京华路安交通科技有限公司）

摘要：桥梁中央分隔带钢护栏设计防护等级为SS级，为考察基于嵌固式基础的该种护栏安全防护性能，建立有限元仿真模型按SS级碰撞条件进行仿真计算后，采用HA级特大型客车进行安全储备仿真分析，在仿真分析基础上组织实车足尺碰撞试验对分析结果进行验证。研究结果表明：桥梁中央分隔带嵌固式基础钢护栏安全性能可靠，同时较设计防护能力具有较大的安全储备。桥梁嵌固式基础钢护栏应用于实际工程中可提供有效的安全防护。

关键词：桥梁护栏；嵌固式基础；有限元分析；仿真计算；实车足尺碰撞试验

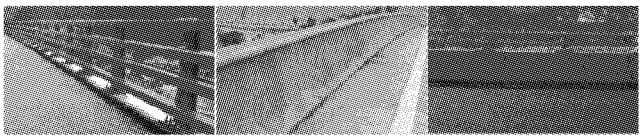
公路中央分隔带护栏作为一种被动安全防护设施，主要用于防止事故车辆穿越中央分隔带进入对向车道。桥梁路段一般处于高位，一旦发生车辆冲入对向车道，救援更为困难，桥梁中央分隔带护栏的安全性能较路基护栏更为重要。目前特大型桥梁中央分隔带一般采用钢护栏，传统设计采用与桥侧护栏相同的方式，多与桥梁翼缘板采用预埋螺栓的方式进行固结。高速公路桥梁桥面一般分为左、右两幅，两道护栏分别防护各侧的车辆撞击，没有充分发挥其使用效率，若利用双幅桥梁翼缘板端部形成嵌固式基础，可将原先需要设置两道护栏的情况变成一道，可有效减少工程造价和增加施工方便性，同时改变护栏基础与桥梁翼缘板之间的受力状态，但需要对其安全性能进行研究和验证。该文以某特大型桥梁为依托，设计出嵌固式基础桥梁中央分隔带钢护栏，建立高精度计算机仿真模型，对该护栏的安全性能进行评估，并组织实车足尺碰撞试验进行验证。

1 桥梁护栏结构

1.1 传统桥梁中央分隔带钢护栏

桥梁护栏主要结构包括梁柱式钢护栏、混凝土护栏、组合式护栏，如图1所示。其中梁柱式钢护栏由横梁和立柱组成，景观较为通透美观，在一些特大桥上应用较为广泛。

目前中国桥梁多为左右分幅建设，传统桥梁护栏基础均与桥梁翼缘板进行固结，对于桥侧位置，由于设置条件受限，传统固结方式较为合理，如图2所示。而对于中央分隔带位置，为实现基础固结，一般需要设置两道护栏，两道护栏完全独立，各自通过桥梁翼缘板锚固。



(a) 梁柱式钢护栏　(b) 混凝土护栏　(c) 组合式护栏

图1 桥梁护栏结构形式

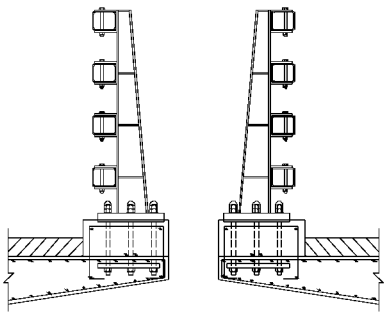


图2 传统桥梁中央分隔带钢护栏

1.2 桥梁嵌固式基础钢护栏的结构

某特大桥主桥部分路段中央分隔带采用SS级钢护栏，利用中央分隔带桥梁翼缘板端部形成嵌固式基础，将护栏嵌固在翼缘板之间。图3为桥梁基础嵌固式钢护栏的构造图：护栏底座嵌固在翼缘板之间，护栏底座下部宽度0.6 m，该部分高度0.2 m，嵌入桥梁翼缘板之间；中部宽度1 m，该部分高度0.1 m，嵌入桥面

收稿日期：2018－10－29

作者简介：刘明虎，男，大学本科，教授级高工，E－mail：liuminghu@hpdi.com.cn

铺装中；上部宽度 1 m，该部分高度 0.13 m，位于路面以上；上部金属梁柱结构高 1.38 m，其中混凝土基座到最上方横梁顶面的有效高度为 1.37 m，结构包括间距 1.5 m 的 H 形立柱(12 mm 厚)、双面四层矩形钢管横梁(160 mm 宽×120 mm 高×6 mm 厚×6 000 mm 长)、横梁内套管(144 mm 宽×100 mm 高×10 mm 厚×1 000 mm 长)、C 形连接钢(155 mm 宽×144 mm 高×10 mm 厚×300 mm 长，展开为 434 mm×300 mm×10 mm)、底板(390 mm×390 mm×35 mm 厚)，C 形连接钢和底板均焊接在立柱上；地脚螺栓采用不低于 8.8 级的 M30 螺栓；横梁与 C 形连接钢，横梁、C 形连接钢、横梁内套管之间采用不低于 8.8 级的 M18 螺栓。

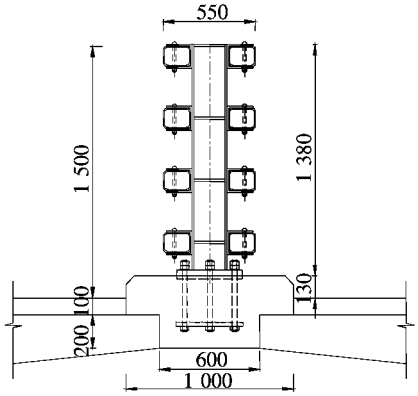


图 3 桥梁嵌固式基础钢护栏(单位：mm)

1.3 传统钢护栏与嵌固基础钢护栏的对比

传统固结方式中央分隔带桥梁钢护栏除了需要设置两道护栏，施工过程需要在桥梁翼缘板内设置预埋螺栓，基础浇筑过程需要对桥梁板顶面进行凿毛，施工过程较为繁琐。合理设计的固结基础钢护栏安全性能可靠，已在多处桥梁工程上应用，取得了较好的应用效果，但是该结构也有一定的隐患：固结基础桥梁钢护栏是否牢固依赖于桥梁翼缘板对预埋螺栓的锚固，若发生车辆碰撞护栏事故，碰撞力过大时，有损伤桥梁翼缘板结构的风险，届时影响桥梁主体安全。

桥梁嵌固式基础钢护栏的设计使双幅桥梁中央分隔带仅需设置一道护栏，护栏基础与两侧翼缘板均未设置实质连接节，护栏的锚固不再依赖桥梁翼缘板的锚固力，更多的是依靠桥梁翼缘板和护栏基础之间的接触力，改变了车辆碰撞护栏时护栏基础和桥梁翼缘板之间的受力状态，降低因车辆碰撞伤害桥梁主体的可能；从施工角度来说，嵌固式基础钢护栏取消了预埋螺栓和混凝土凿毛的施工工序，可大幅提高施工方便性、降低工程造价，同时有利于缩短施工周期和方便运营期维护，具有较大的优越性。

2 安全性能仿真分析

2.1 计算机仿真理论基础

采用大变形动态显示有限元方法，拉格朗日增量描述的动态显式有限元求解方程为：

$$M\ddot{x}(t)=P(t)-F(t)-C\dot{x}(t) \tag{1}$$

式中：M 为质量矩阵；$\ddot{x}(t)$和$\dot{x}(t)$分别为节点加速度向量和速度向量；$P(t)$和 $F(t)$分别为载荷向量和单元应力场的等效节点力向量；C 为阻尼矩阵。通过中心差分法对式(1)进行求解，有：

$$\begin{cases}\ddot{x}(t_n)=M^{-1}\left[P(t_n)-F(t_n)-C\dot{x}(t_{n-\frac{1}{2}})\right]\\ \dot{x}(t_{n-\frac{1}{2}})=\dfrac{1}{2}(\Delta t_{n-1}+\Delta t_n)\ddot{x}(t_n)\\ x(t_{n+1})=x(t_n)+\Delta t_n\dot{x}(t_{n+\frac{1}{2}})\end{cases} \tag{2}$$

$$\begin{cases}t_{n-\frac{1}{2}}=\dfrac{1}{2}(t_n+t_{n-1})\\ t_{n+\frac{1}{2}}=\dfrac{1}{2}(t_{n+1}+t_n)\end{cases} \tag{3}$$

$$\begin{cases}\Delta t_{n-1}=(t_n-t_{n-1})\\ \Delta t_n=(t_{n+1}-t_n)\end{cases} \tag{4}$$

式中：$\ddot{x}(t_n)$、$\dot{x}(t_{n-\frac{1}{2}})$、$x(t_{n+1})$分别为节点加速度向量、速度向量、位移向量；$P(t_n)$、$F(t_n)$分别为对应时刻的荷载与节点力向量。

当时间步长 Δt小于临界值 Δt_{cr}时，可得到稳定的计算结果，即：

$$\Delta t\leqslant\Delta t_{cr}=\frac{2}{\omega_{\max}}=\frac{L_s}{c} \tag{5}$$

$$C=\sqrt{\frac{E}{\rho(1-\upsilon^2)}} \tag{6}$$

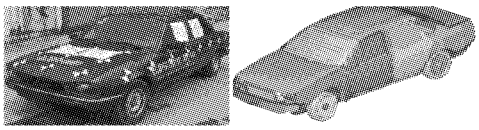
$$L_s=\begin{cases}\dfrac{A_s}{\max(L_1,L_2,L_3,L_4)}(\text{四边形单元})\\ \dfrac{A_s}{\max(L_1,L_2,L_3)}(\text{三角形单元})\end{cases} \tag{7}$$

式中：$\omega_{\max}$为系统最高固有频率；L_s为单元特征长度；c为声速；E 为杨氏弹性模量；ρ 为材料密度；υ 为泊松比；A_s为单元面积；$L_i(i=1,2,3,4)$为单元边长。

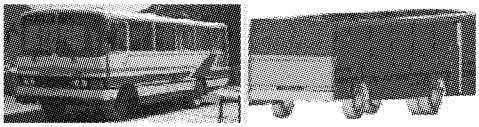
2.2 计算机仿真模型

根据相关标准试验车辆特点，按实际尺寸建立小客车、大客车、大货车的仿真模型如图 4 所示。在仿真模型中，以擅长大变形的四边形单元为主，并控制单元

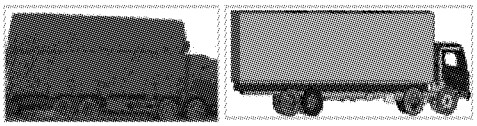
质量。采用试验的方法确定车身单元的材料属性，采用 Cowper－Symons 模型考虑材料的应变率效应，选择 Automatic Single Surface 接触类型中的罚函数方法。



(a) 小客车



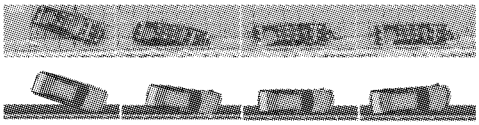
(b) 大客车



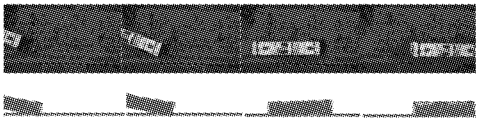
(c)大货车

图 4　车辆物理模型与仿真模型

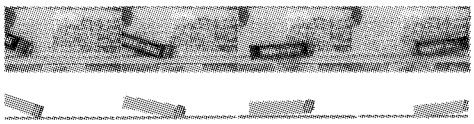
以某高防护等级组合式护栏实车足尺碰撞试验数据为基础对仿真模型的准确性进行验证，图 5 为 3 种车型碰撞该护栏的过程，计算机仿真模拟轨迹、形态与试验较为一致。



(a) 小客车



(b) 大客车

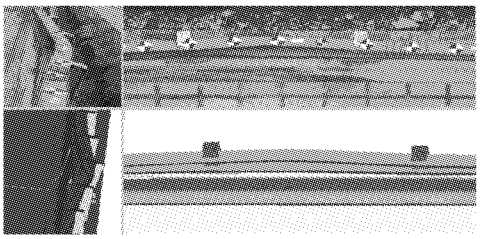


(c)大货车

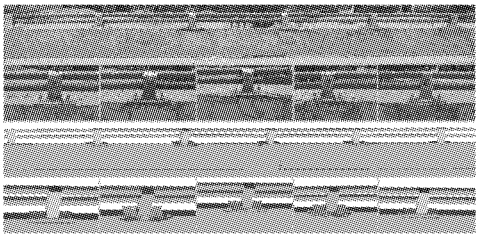
图 5　车辆碰撞护栏过程仿真与试验对比

图 6 为组合式护栏变形试验与仿真对比图，上部钢结构变形和下部混凝土结构破坏仿真结果与试验结果一致。

以经过实车碰撞试验验证后的仿真模型为基础，根据桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏设计结构建立护栏仿真模型如图 7 所示。



(a) 上部钢结构



(b) 下部混凝土结构

图 6　护栏变形情况物理模型与仿真模型

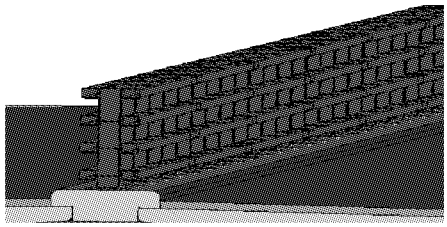


图 7　桥梁中央分隔带嵌固式基础钢结构护栏仿真模型

3　安全性能仿真分析

3.1　设计防护等级下安全分析

桥梁嵌固式基础钢护栏设计防护等级为 SS 级，按照 SS 级碰撞条件的规定建立车辆碰撞护栏模型，分析护栏的安全性能。碰撞条件如表 1 所示。

表 1　SS 级碰撞条件

碰撞车型	车辆总质量/t	碰撞速度/(km·h^{-1})	碰撞角度/(°)
小客车	1.5	100	20
大客车	18.0	80	20
大货车	33.0	60	20

图 8 为小客车碰撞过程，车辆顺利驶出，护栏的阻挡功能良好。

图 8　小客车碰撞护栏过程

表 2 为小客车碰撞桥梁嵌固式基础钢护栏的缓冲指标数据，满足乘员碰撞后加速度纵向和横向分量均不得大于 200 m/s^{2}和乘员碰撞速度纵向和横向分量均不得大于 12 m/s 的要求，护栏的缓冲功能良好。

表 2 小客车碰撞护栏缓冲指标数据

项目	乘员碰撞速度/(m·s^{-1})		乘员碰撞后加速度/(m·s^{-2})	
	纵向 X	横向 Y	纵向 X	横向 Y
测量值	5.8	7.9	35.5	62.6
是否合格	合格	合格	合格	合格

图 9 为小客车行驶轨迹图，小客车驶离护栏后 10 m 未越出驶出框，且碰撞护栏后车辆未翻车，护栏导向功能良好。

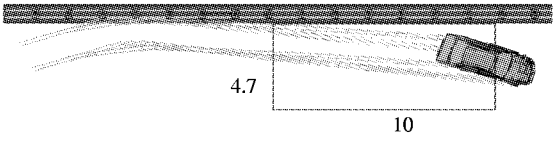


图 9 小客车碰撞护栏行驶轨迹图(单位：m)

图 10 为大客车碰撞过程，车辆顺利驶出，护栏的阻挡功能良好。

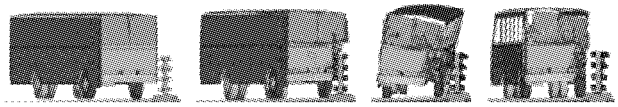


图 10 SS 级护栏大客车碰撞过程

图 11 为大客车行驶轨迹图，大客车驶离护栏后 20 m 未越出驶出框，且碰撞护栏后车辆未翻车，护栏导向功能良好。

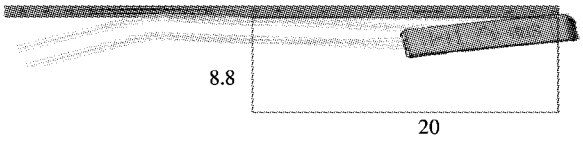


图 11 SS 级大客车碰撞护栏行驶轨迹图(单位：m)

图 12 为大客车碰撞后护栏破坏情况，碰撞区域护栏横梁有挤压变形，立柱发生倾斜；如图 13 所示，从隐藏铺装层和护栏基座可以看到，护栏下部的桥梁板没有任何损坏，可以看出车辆碰撞护栏过程对桥梁主体的影响较小。

图 14 为整体式货车碰撞过程，车辆顺利驶出，护栏的阻挡功能良好。

图 15 为整体式货车行驶轨迹图，可以看出整体式货车驶离护栏后 20 m 未越出驶出框，且碰撞护栏后车辆未翻车，护栏导向功能良好。

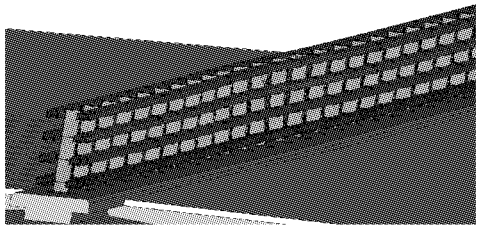


图 12 SS 级大客车碰撞后护栏情况

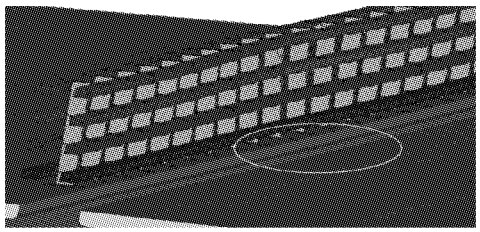


图 13 SS 级大客车碰撞后翼缘板情况

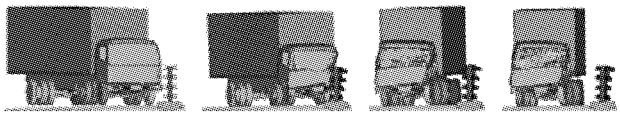


图 14 SS 级整体式货车碰撞过程

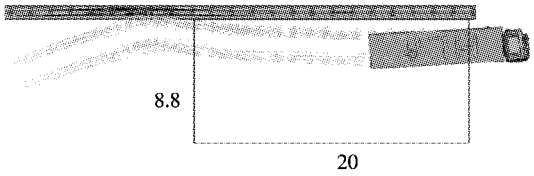


图 15 SS 级整体式货车碰撞行驶轨迹图(单位：m)

图 16 为整体式货车碰撞后护栏破坏情况，碰撞区域护栏横梁挤压变形，其中最上方横梁损坏最为严重，碰撞区域立柱发生倾斜；如图 17 所示，从隐藏铺装层和护栏基座可以看到，护栏下部的桥梁板没有任何损坏，可以看出车辆碰撞护栏过程对桥梁主体的影响较小。

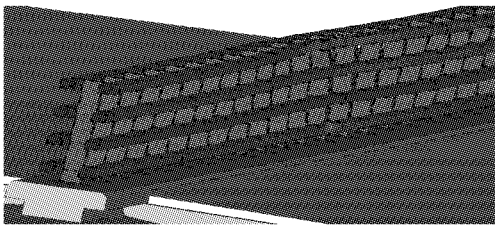


图 16 SS 级整体式货车碰撞后护栏情况

3.2 安全储备分析

若中央分隔带护栏安全性能不足，未能对失控车辆进行有效防护，不仅事故车辆自身造成损失，甚至穿

越护栏冲至对向行车道与来车相撞，若大客车发生该类事故极易造成群死群伤的恶性二次事故。因此采用大客车并提高其碰撞能量，对桥梁嵌固式基础钢护栏的安全性进行进一步的分析。

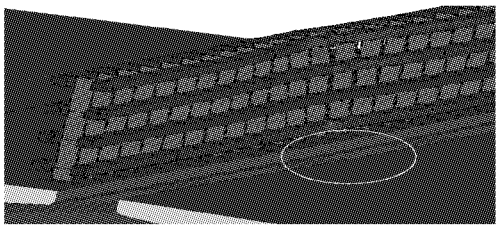


图 17　SS 级整体式货车碰撞后翼缘板情况

采用 HA 防护等级的特大型客车，碰撞条件如表 3 所示，碰撞能量按照公式计算为 $E=\frac{1}{2}m\ (v\sin\theta)^2=816$ kJ。

表 3　HA 级特大型客车碰撞条件

碰撞车型	车辆总质量/t	碰撞速度/(km·h^{-1})	碰撞角度/(°)
特大型客车	25	85	20

图 18 为 HA 级特大型客车碰撞过程，车辆顺利驶出，护栏的阻挡功能良好。

图 18　HA 级特大型客车碰撞过程

图 19 为特大型客车行驶轨迹图，特大型客车驶离护栏后 20 m 未越出驶出框，且碰撞护栏后车辆未翻车，护栏导向功能良好。

图 19　HA 特大型客车碰撞行驶轨迹图(单位：m)

图 20 为大客车碰撞后护栏破坏情况，碰撞区域护栏横梁有挤压变形，立柱发生不同程度倾斜；如图 21 所示，从隐藏铺装层和护栏基座可以看到，护栏下部的桥梁板没有任何损坏，可以看出车辆碰撞护栏过程对桥梁主体的影响较小。

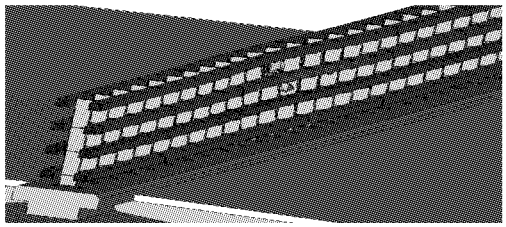


图 20　HA 级大客车碰撞后护栏情况

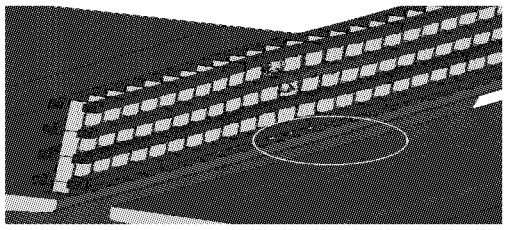


图 21　HA 级大客车碰撞后翼缘板情况

4　实车足尺碰撞试验

按照 HA 级特大型客车碰撞条件组织进行实车足尺碰撞试验，对桥梁嵌固式基础钢护栏的安全性能进行进一步验证。图 22 为试验所用车辆和修建的试验护栏。

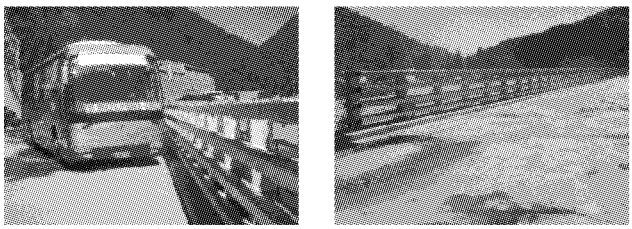
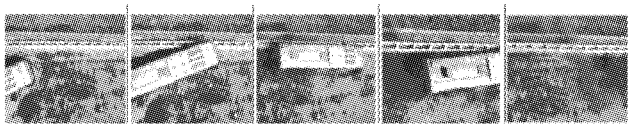
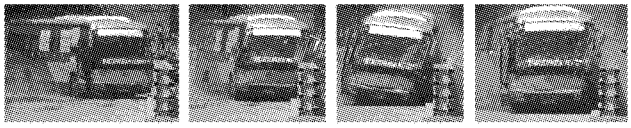


图 22　试验车辆与试验护栏

图 23 为 HA 级特大型客车碰撞桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏过程，车辆顺利导出，护栏各部分构件和脱离构件未侵入乘员舱，护栏的阻挡功能良好。



(a) 俯视图



(b) 前视图

图 23　HA 级特大型客车试验碰撞护栏过程

图 24 为特大型客车碰撞桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏行驶轨迹图，特大型客车驶离护栏后 20 m 未越出驶出框且未发生翻车，护栏导向功能满足要求。

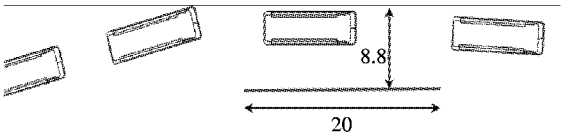


图 24 特大型客车碰撞护栏行驶轨迹图(单位：m)

特大型客车碰撞基础嵌固式钢护栏后，钢护栏发生变形，部分立柱发生倾斜，最大残余变形为 0.13 m，车辆与护栏的刮擦长度为 11 m，如图 25 所示。

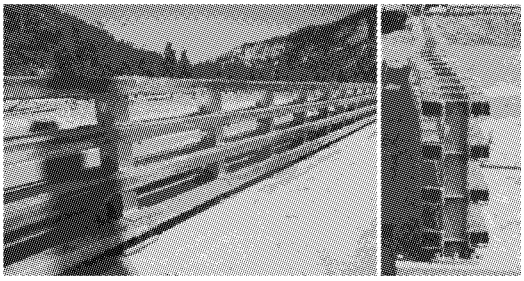


图 25 特大型客车碰撞后护栏变形情况

图 26 为特大型客车碰撞护栏后车辆损坏情况。特大型客车碰撞基础嵌固式钢护栏过程中前保险杠变形损坏，车辆前大灯损坏脱落，前挡风玻璃破裂，碰撞侧车体有变形。

图 26 特大型客车碰撞护栏后车辆损坏情况

试验测量得到其他参数如表 4 所示。

表 4 特大型客车碰撞护栏试验所得部分参数 m

护栏最大横向动态变形值	护栏最大横向动态位移外延值	车辆最大动态外倾值	车辆最大动态外倾当量值
0.2	0.8	0.35	0.45

根据试验实际测量数据，该特大型客车碰撞护栏的实际碰撞条件如表 5 所示，碰撞能量为 851 kJ。

表 5 特大型客车碰撞护栏试验的实际碰撞条件

碰撞车型	车辆总质量/t	碰撞速度/(km·h^{-1})	碰撞角度/(°)
特大型客车	25.089	85.9	20.2

HA 级特大型客车碰撞基础嵌固式钢护栏的各项指标均满足要求，护栏体现出良好的安全防护能力，同时验证嵌固式基础安全性能可靠。

5 结语

桥梁嵌固式基础中央分隔带钢护栏创造性地采用嵌固式基础，使需要设置两道护栏的分离式桥梁中央分隔带仅需设置一道护栏。通过计算机仿真对护栏的安全性能进行分析，并采用实车足尺碰撞试验进行验证，桥梁嵌固式基础钢护栏安全性能可靠，同时具有较大的安全储备，该护栏在实际应用中可为公路提供有效的安全防护。

参考文献：

[1] JTG B05－01－2013 公路护栏安全性能评价标准[S].
[2] JTG D81－2017 公路交通安全设施设计规范[S].
[3] JTG/T D81－2017 公路交通安全设施设计细则[S].
[4] 闫书明，惠斌，李巍，等.基于碰撞分析的特高防撞等级桥梁护栏安全评价[J].特种结构，2010(1).
[5] 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(1).
[6] 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(1).