

SS级装配式混凝土护栏钢筋错位拼插连接设计及碰撞性能研究

叶鹏飞¹, 尼颖升²

(1. 江西省天驰高速科技发展有限公司, 江西 南昌 330108; 2. 交通运输部公路科学研究院, 北京市 100088)

摘要: 为提升桥梁装配式混凝土护栏的施工效率与连接可靠性,以桂林市外环高速公路工程为背景,提出一种采用U型钢筋错位拼插竖向连接与纵向剪力铰组合的护栏连接方案。介绍了钢筋错位拼插连接和纵向剪力铰的设计原理并进行了承载力验算。基于LS-DYNA建立了护栏-车辆耦合有限元模型,开展了大型客车、大型货车和小型客车的碰撞仿真分析。结果表明,护栏端部和中部的横向承载力均达到《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)规定的最高桥梁护栏设计防护等级规定,3种不同车型碰撞下的护栏横向动态变形、车辆外倾当量值和乘员加速度同样满足相关要求。与现有护栏连接方案相比,所提方案的综合单价较现浇方案节约了12.8%,并在安装容差、施工速度和综合造价方面具有明显优势。

关键词: 装配式混凝土护栏; SS级桥梁护栏设计防护等级; 钢筋错位拼插; 剪力铰; 护栏-车辆耦合有限元模型; 碰撞仿真

中图分类号:

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2026)09-0080-08

Research on Design and Crash Performance of SS-Class Prefabricated Concrete Guardrails with Staggered Steel Bar Lap-splice Connections

YE Pengfei¹, NI Yingsheng²

(1. Jiangxi Tianchi Expressway Technology Development Co., Ltd., Nanchang 330108, China; 2. Highway Research Institute of the Ministry of Transport, Beijing 100088, China)

Abstract: To enhance the construction efficiency and connection reliability of prefabricated concrete guardrails for bridges, based on the Guilin Outer Ring Expressway Project, a guardrail connection scheme is proposed, which combines a staggered U-shaped steel bar lap-spliced vertical connection with a longitudinal shear hinge. The design principles of the staggered steel bar lap-spliced connection and the longitudinal shear hinge are introduced, and their load-bearing capacities are verified. A guardrail-vehicle coupled finite element model is established using LS-DYNA, and crash simulations are performed for a large bus, a large truck and a small passenger car. The results indicate that the transverse load-bearing capacities at both the end and middle sections of the guardrail meet the highest design protection level for bridge guardrails specified in the *Highway Guardrail Safety Performance Evaluation Standards* (JTG B05-01 - 2013). Furthermore, the transverse dynamic deflection of the guardrail, the vehicle rollover equivalent value, and the occupant acceleration under collisions with the three vehicle types also satisfy the corresponding requirements. Compared with existing guardrail connection methods, the comprehensive unit price of the proposed scheme is 12.8% lower than that of the cast-in-place scheme, which has obvious advantages in installation tolerance, construction speed and comprehensive cost.

Keywords: prefabricated concrete guardrail; SS-Class bridge guardrail design protection level; staggered steel bar lap-splice; shear hinge; guardrail-vehicle coupled finite element model; crash simulation

0 引言

防撞护栏是高速公路桥梁重要的安全设施,对车辆失控事故起到拦阻和导向作用^[1-2]。传统的现

浇混凝土护栏需要在桥梁主体完工后进行现场支模、绑扎钢筋、浇筑和养护,工序复杂、临空作业风险高,且外观质量受现场条件影响较大^[3-4]。2022年交通运输部先后发布了《公路装配式混凝土桥梁设计规范》(JTG/T 3365-05—2022)^[5]和《公路装配式混凝土桥梁施工技术规范》(JTG/T 3654—2022)^[6],标志着公路装配式桥梁进入产业化发展阶段。护栏作为

收稿日期: 2016-06-01

作者简介: 叶鹏飞(1990—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁养护与加固设计等工作。

桥梁施工流程末端的构件,采用预制装配技术可有效保证加工质量、降低现场施工的安全风险并缩短施工周期^[7-8]。

由于护栏截面尺寸较小、受力复杂,应用预制护栏技术的难点在于对连接方案的设计,具体体现在护栏与桥面板的竖向连接^[9]和预制护栏节段之间的纵向连接两个方面^[10]。现有装配式护栏的连接方案根据连接形式的不同可归纳为三类:一是钢套筒灌浆连接^[11-12]。该方案使用钢套筒作为护栏的连接件,能够使连接部位的抗拉承载力达到200 kN以上,但对安装精度的要求较高(<2 mm),对曲线梁段的适应性较差。此外,钢套筒的单价昂贵、使用量大,在经济性上不具备优势;二是后浇带整体连接^[13-16]。该方案对施工精度的要求较低(容差可达20 mm),但由于后浇带位于桥面铺装层内,存在刚度不匹配和排水不畅等问题,在桥面大修时易产生损伤。同时,后浇带需要较长的养护周期(7~14 d),对工期的影响较大;三是预应力筋竖向锚固^[17-18],连接可靠性高,但施工工序复杂、张拉设备需求大、后期预应力损失难以监测。由此可见,现有护栏连接方案难以兼顾安装容差、耐久性和经济性,限制了装配式护栏在高防护等级桥梁中的推广应用。

为解决上述问题,本文以桂林市外环高速公路工程为背景,提出一种适用于最高桥梁护栏设计防护等级(SS级)的装配式混凝土护栏连接方案,并从构造设计、承载力验算、碰撞仿真分析和多方案综合比较等方面开展系统研究,为SS级装配式护栏的设计与应用提供技术参考。所提方案将预制护栏钢筋与桥面板预埋U型钢筋错位拼插布置,通过浇筑混凝土后浇带形成整体竖向连接,并采用UHPC剪力铰连接护栏的纵向节段。该方案保留了后浇带连接方案的安装容差优势(纵向30 mm、横向15 mm),同时避免了位于铺装层内的横向后浇带的耐久性问题。与钢套筒连接相比,该方案无需高精度对位和灌浆操作,能够显著提升施工效率。与预应力连接相比,所提方案简化了施工工序,降低了对施工设备的需求。此外,纵向连接使用的UHPC剪力铰可通过嵌固咬合作用传递剪力,解决了平缝连接无法有效传递剪力的技术难题。

1 连接构造设计

1.1 工程概况

本文依托桂林外环高速公路工程,公路全长

123.9 km,主线采用4车道高速公路设计标准,设计速度120 km/h,路基宽度26.5 m。全线共设主线桥90座,桥梁全长36 732.4 m,占路线总长29.55%,以小箱梁为主。桥梁护栏的设计防护等级为SS级(六级),是《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)^[19]中的最高防护等级,要求能够拦阻和导向大型货车(质量33 t,碰撞速度80 km/h,碰撞角度20°)。

1.2 总体方案设计

桂林外环SS级护栏原初步设计采用现浇F型混凝土护栏,总高度130 cm,行车道侧外露面高度110 cm,顶宽20 cm,底宽50 cm,护栏主体采用C40混凝土进行预制。综合考虑防护能力、线形适应性、施工可行性和经济性,拟定了四种装配式方案进行比选。

1.2.1 方案1(推荐方案)

如图1所示,加强型F型截面,钢筋竖向拼插连接。护栏预制部分高130 cm,底部预留后浇带接口(宽25 cm、高26.5 cm),预制钢筋与桥面板预埋U型钢筋错位拼插后浇筑C50混凝土。纵向采用剪力铰连接,铰缝灌注U120超高性能混凝土。标准段长5.0 m,重约6.0 t。

1.2.2 方案2

加强型F型截面,钢套筒竖向连接。护栏全截面预制,预埋外径44 mm、壁厚4 mm机械加工套筒,安装后与桥面板预埋钢筋灌浆连接。护栏构造和配筋与原设计相同,纵向连接与方案一一致。该方案在美国快速工法^[12]桥梁中有应用案例,但对安装精度要求较高,对曲线梁适应性较差,且钢套筒费用较高。

1.2.3 方案3

加强型F型截面,钢筋横向拼插连接。护栏预制后通过横向后浇带(宽30 cm、高20 cm)与桥面板连接,后浇带采用C40混凝土。该方案^[13-16]的安装精度要求较低、后浇带施工便利,但后浇带位于沥青铺装层内,存在刚度不匹配和排水问题,桥面大修时易损坏。

1.2.4 方案4

单坡形截面,钢筋横向拼插连接。护栏内侧迎撞面倾角9.75°,底面宽45 cm,截面构造简单、便于预制。竖向采用后浇带连接(宽50 cm、厚16 cm),纵向为铰缝连接。该方案^[10]造价较低,但同样存在后浇带与沥青铺装刚度不匹配的问题。

1.3 U型钢筋错位拼插竖向连接

推荐方案所采用的U型钢筋错位拼插竖向连接

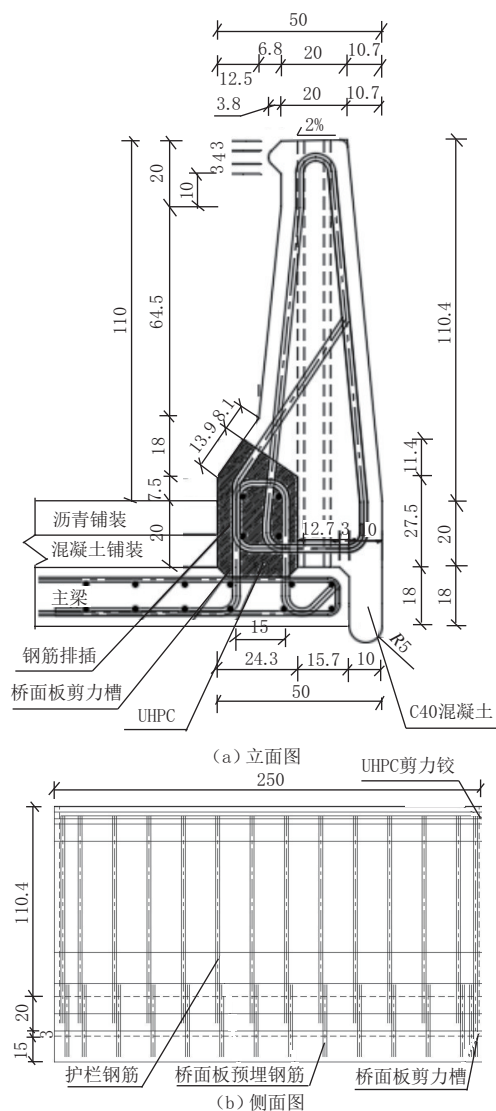


图1 护栏横断面构造及竖向主筋布置(单位:cm)

的受力过程可分为3个阶段:(1)弹性阶段——碰撞荷载通过护栏传递至后浇带区域,预制侧纵筋与预埋U型筋通过后浇混凝土的握裹力协同工作,荷载沿钢筋轴向传递至桥面板预埋锚固区;(2)带裂缝工作阶段——后浇带混凝土开裂后,受力机制发生转变。钢筋的销栓作用(dowel action)和混凝土骨料的咬合作用共同承担剪力,错位布置的钢筋在后浇带内形成空间桁架传力体系;(3)极限阶段——钢筋达到屈服强度,最终因后浇带内的钢筋拔出或拉断而破坏。钢筋错位布置引起的偏心距 $e=15\sim 30\text{ mm}$ (取决于横向安装误差),会在连接界面产生附加弯矩 $M=e\cdot V$ (V 为界面剪力)。计算表明,在SS级碰撞荷载下该附加弯矩占截面总弯矩的比例不超过8%,弯剪耦合效应有限,可按独立轴力-剪力模式简化计算。错位间距 s 与握裹力之间满足关系:

$$\tau_b = \sigma_s \cdot A_s / (\pi \cdot d \cdot l_a)$$

式中: σ 为钢筋应力; A 为钢筋面积; d 为钢筋直径; l

为锚固长度。

当错位间距 $s \leq 2d$ 时, 钢筋间混凝土的局部压碎区不重叠, 握裹力可完全发挥。本方案错位间距取 $5d$ ($d=16 \text{ mm}$ 时 $s=80 \text{ mm}$), 握裹承载力安全裕量充足。

钢筋错位拼插设计的核心优势在于:在纵向和横向分别预留了 30 mm 和 15 mm 的安装容差,施工时可通过调整钢筋的相对位置灵活适配桥面板的施工误差。与钢套筒连接方案相比,该方案对安装精度的要求显著降低,对曲线梁段的线形适应性更强。为了确保错位拼插钢筋的准确对接,箱梁预制时采用定位尺控制预埋件安装,误差应小于 1 mm。安装完成后需进行复核以确保误差小于 2 mm。

护栏与桥面板之间设置微膨胀水泥基黏层砂浆,砂浆的28 d抗压强度不小于60 MPa,28 d竖向膨胀率不大于0.1%,坐浆厚度一般为2.0 cm,可根据标高误差适当调整,标高误差可调整量为15 mm。

1.4 纵向剪力铰连接

推荐方案采用剪力铰进行纵向连接(见图2)。在护栏预制节段的两端分别设置凹形和凸形铰槽,安装后相邻节段的铰槽形成闭合铰缝,铰缝横向宽度10 cm,纵向宽度7 cm,倒角尺寸2.0 cm×3.0 cm。铰缝内灌注U120超高性能混凝土(ultra-high performance concrete, UHPC),无配筋。通过剪力铰的嵌固咬合作用,实现预制节段之间的协同受力与剪力传递,避免了平缝连接无法有效传递剪力的弊端。与传统方案相比,剪力铰连接传力路径明确,可在安装多段护栏后一次性浇筑多道铰缝,提高了施工效率。

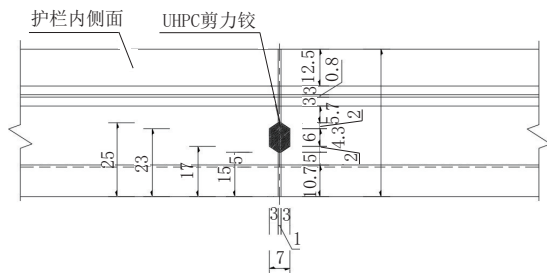


图2 纵向铰缝平面构造(单位:cm)

1.5 整体施工流程

推荐方案的施工流程为:护栏预制节段划分与匹配→护栏节段预制和存放→桥梁标高测量和砂浆厚度确定→标高调整块安装和粘层砂浆铺设→护栏吊装坐浆和临时固定焊接→拼插钢筋安装→后浇带C50混凝土浇筑→铰缝UHPC灌注→伸缩缝盖板安装。护栏节段可倒立完成预制,并利用吊环和外露拼插钢筋转正。

2 承载能力验算

2.1 材料参数

参照《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)^[20],预制护栏的主体部分使用 C40 混凝土,抗压和抗拉强度标准值分别为 26.8 MPa 和 2.4 MPa。竖向连接后浇带采用 C50 防水混凝土,抗压和抗拉强度标准值分别为 32.4 MPa 和 2.65 MPa。纵向铰缝采用 UHPC,抗压和抗拉强度标准值分别为 84 MPa 和 5.7 MPa。钢筋采用 HRB400,抗拉强度标准值为 400 MPa。

2.2 横向承载力验算

参照《公路交通安全设施设计细则》(JTG/TD81—2017)^[21]附录 D,对端部护栏和中部护栏的总横向承载力 R_w 进行计算。

计算时考虑如下假定:(1)护栏与桥面板的竖向连接视为刚接,按整体截面计算;(2)屈服线沿护栏纵向沿伸,屈服线长度按规范公式 $L_c=L_t+(H/2)$ 确定,其中 L_t 为车辆荷载分布宽度(取 2.4 m), H 为护栏高度(1.3 m);(3)材料强度均取标准值,不考虑分项系数。

取单位宽度竖截面,按双筋截面计算受弯承载力,受拉钢筋为外侧 6 根 HRB400 直径 16 mm ($A_s=1\,206\text{ mm}^2$),受压钢筋为内侧 4 根 ($A'_s=804\text{ mm}^2$),截面有效高度 $h_0=1\,170\text{ mm}$,按规范式(D-1)计算得端部护栏绕纵轴的抗弯承载力 $M_x=152.7\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。按规范式(D-2)取护栏全截面计算绕竖轴的抗弯承载力 $M_y=47.7\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。屈服线临界长度 L_c 按式(D-3)计算,得到 $L_c=L_t+(H/2)=2.4+0.65=3.05\text{ m}$,再按式(D-4)折减后取 $L_c=2.56\text{ m}$ 。代入式(D-5)可以得到端部护栏的总横向承载力 $R_w=601.0\text{ kN}$ 。

计算中部护栏的总横向承载力时,考虑两侧均有相邻节段的约束作用,绕纵轴的抗弯承载力 M_x 降低(相邻段分担弯矩),按规范式(D-6)计算得 $M_x=99.3\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。绕竖轴的抗弯承载力 M_y 与端部相同(47.7 kN·m), L_c 按式(D-7)计算,结果为 2.67 m,代入式(D-5)可以得到中部护栏的总横向承载力 $R_w=571.1\text{ kN}$ 。

横向承载力验算结果如图 3 所示。可以看到,两者均大于根据桥梁护栏的设计防护 SS 级的要求换算的承载能力安全阈值 $F_t=520\text{ kN}$,安全裕量分别为 15.6% 和 9.8%,满足规范要求。

2.3 抗剪承载力验算

进一步对前述纵向铰缝和竖向连接后浇带进行

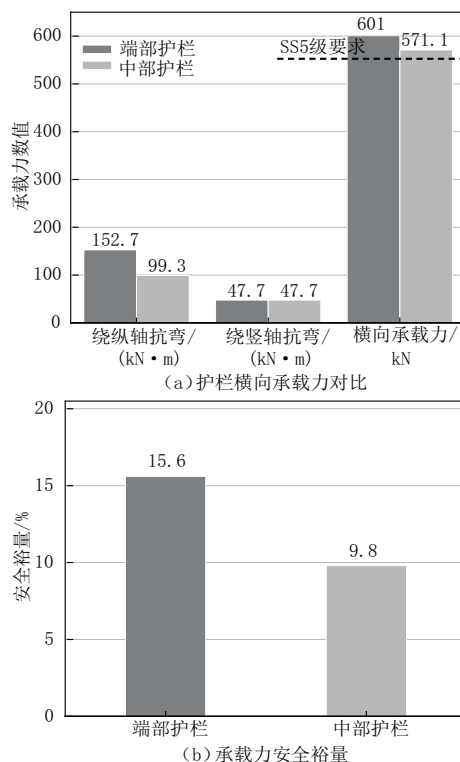


图 3 护栏横向承载力验算结果

抗剪承载力验算,验算结果如图 4 所示。外、内铰口(C40 混凝土)的抗剪承载力分别为 $R_{t1}=335.3\text{ kN}$ 和 $R_{t2}=417.1\text{ kN}$,UHPC 铰体的抗剪承载力为 $R_{t3}=443.5\text{ kN}$,均大于 $520/2=260\text{ kN}$ 。竖向连接后浇带的抗剪连接强度为 269.9 kN,大于双肢 16 mm HRB400 钢筋的抗拉标准强度 160.8 kN。预制侧和后浇侧的底部纵向铰缝的抗剪承载力分别为 89.6 kN 和 88.8 kN,均大于单肢 16 mm 钢筋抗拉标准强度 80.4 kN。各连接部位抗剪承载力均满足要求。

3 数值模拟反演计算

3.1 有限元模型建立

3.1.1 结构模型

以 LS-DYNA 为求解器建立护栏-车辆碰撞耦合模型。计算模型以桂林外环高速 35 m 跨径小箱梁为基准结构。所建立的护栏-小箱梁有限元模型如图 5 所示。小箱梁仅建立边梁及铺装,其余部分以刚性面替代以控制计算规模。箱梁两端分别设置固定支座和滑动支座。护栏和箱梁内的钢筋按实际设计布置。混凝土和钢筋分别采用 8 节点六面体实体单元和梁单元进行模拟,二者间的黏结作用通过 *CONSTRAINED_LAGRANGE_IN_SOLID 耦合约束模拟。不考虑护栏与桥面板砂浆层之间的粘结强度。纵向接缝只考虑 UHPC 铰缝的抗剪作用。

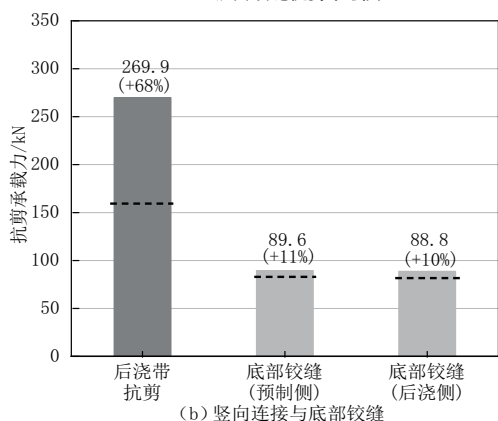
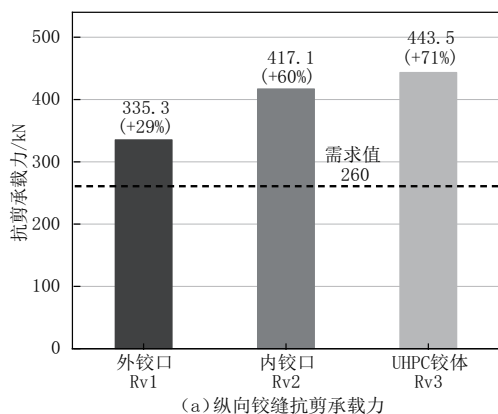


图4 护栏抗剪承载力验算结果

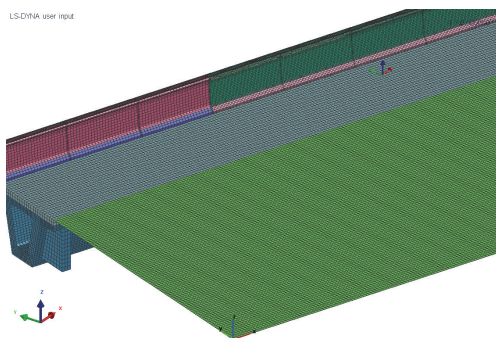


图5 护栏-小箱梁有限元模型

3.1.2 车辆模型

按《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)^[19]确定3种试验车辆的关键参数如表1所示。3种试验车辆的有限元模型如图6所示。车身主要使用四边形壳单元进行模拟,最小特征长度约5 mm。车辆各部件之间使用点焊连接,车门和车体则通过铰接点连接,并将配载简化为质量点。采用Cowper-Simonds模型模拟车身材料的动态塑性应变率效应。

表1 碰撞仿真车辆主要技术参数

参数	大型客车	大型货车	小型客车
车辆总质量/kg	18 090	33 105	1 499
轴距/mm	6 505	8 520	2 720
车辆总长/mm	12 683	12 571	4 600
车辆总宽/mm	2 566	2 486	1 795
重心高度/mm	1 364	1 917	526

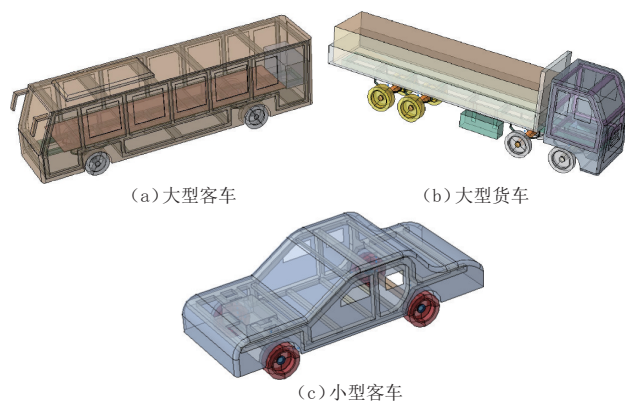


图6 车辆模型

3.1.3 碰撞条件与评价指标

碰撞条件按SS级要求设定,即碰撞速度为80 km/h,碰撞角度为20°。安全性能评价采用3项指标,具体如下。

3.1.3.1 阻挡功能

车辆不得穿越、翻越或骑跨护栏,护栏构件及脱离件不得侵入车辆乘员舱。

3.1.3.2 导向功能

车辆碰撞后的轮迹应满足导向驶出框的要求($A \leq 10$ m、 $B \leq 20$ m)。

3.1.3.3 缓冲功能

乘员碰撞速度的纵向和横向分量 ≤ 12 m/s,乘员碰撞后加速度的纵向和横向分量10 ms间隔平均值 ≤ 200 m/s²。

3.2 大型客车碰撞仿真分析结果

大型客车碰撞仿真分析结果如表2所示。大型客车(18 t)按规定的碰撞条件进行撞击后,车辆被成功拦阻并导出,未发生穿越和翻越等情况。轮迹通过驶出框($A=9.0$ m、 $B=20.0$ m),距护栏最远 $X=2.6$ m。护栏顶部有大范围混凝土剥离,但结构整体保持完好。竖向接缝和纵向铰缝主拉应力的最大值分别为0.569 MPa和0.492 MPa,远低于C50混凝土的抗拉强度标准值2.65 MPa。可见,推荐方案满足大型客车的SS级防护要求。

表2 大型客车碰撞仿真分析结果

单位:m

序号	参数	数值
1	护栏最大横向动态变形值 D	0.043
2	护栏最大横向动态位移外延值 W	0.543
3	车辆最大动态外倾值 VI	1.03
4	车辆最大动态外倾当量值 VI_n	1.32

3.3 大型货车碰撞仿真分析结果

大型货车碰撞仿真分析结果如表3所示。大型货车(33 t)碰撞后同样被成功拦阻,驶出框 $A=8.9$ m、

$B=20.0\text{ m}$, $X=3.31\text{ m}$ 。货车底盘低、重心高($1\,917\text{ mm}$),碰撞主要作用于护栏根部,横向变形 D 仅 0.030 m 。预制主体与铰缝均无明显损伤。乘员速度分量分别为 $v_x=4.8\text{ m/s}$ 和 $v_y=7.2\text{ m/s}$,均满足要求。可见,推荐方案满足大型货车的SS级防护要求。

表3 大型货车碰撞仿真分析结果 单位:m

序号	参数	数值
1	护栏最大横向动态变形值 D	0.030
2	护栏最大横向动态位移外延值 W	0.530
3	车辆最大动态外倾值 VI	0.892
4	车辆最大动态外倾当量值 VI_n	1.35

3.4 小型客车碰撞仿真分析结果

小型客车碰撞仿真分析结果如表4所示。小型客车(1.5 t)碰撞后顺利导出,驶出框 $A=4.7\text{ m}$ 、 $B=10.0\text{ m}$,撞面最远距离 $X=2.82\text{ m}$,满足边界要求,护栏无损伤。乘员速度分量分别为 $v_x=4.0\text{ m/s}$ 和 $v_y=6.0\text{ m/s}$,均小于 12 m/s ;加速度分量分别为 $a_x=-85.3\text{ m/s}^2$ 和 $a_y=-119.6\text{ m/s}^2$,均小于 200 m/s^2 ,安全裕量充足(见表4)。可见,推荐方案满足小型客车的SS级防护要求。

表4 小型客车乘员碰撞速度和碰撞后加速度计算结果 单位:m/s

序号	评价指标	计算值	容许值
1	碰撞速度纵向分量 v_x	4.0	12
2	碰撞速度横向分量 v_y	6.0	12
3	碰撞后加速度纵向分量 a_x	-85.3	200
4	碰撞后加速度横向分量 a_y	-119.6	200

3.5 仿真分析结果综合分析

三种碰撞工况仿真结果的对比如图7所示。可以看到,推荐方案在阻挡、导向和缓冲3项指标上全部满足《公路护栏安全性能评价标准》(JTGB05-01—2013)^[19]的SS级要求。

从受力机理来看,3种车型的碰撞响应呈现明显的梯度特征:大型客车(18 t)因接触面积大、碰撞位置高,引起的护栏横向变形和混凝土剥离最为显著,是控制设计的最不利工况;大型货车(33 t)虽然总质量最大,但碰撞重心低($1\,917\text{ mm}$),对护栏根部的局部冲击更强,整体变形反而更小;小型客车(1.5 t)冲击能量最小,主要考验护栏的乘员缓冲性能。

从缓冲性能看,3种工况的乘员碰撞速度和加速度均远低于标准限值。其中小型客车的加速度峰值出现在碰撞后 $0.1\sim 0.25\text{ s}$ 时段(见图8),最大值 $a_x=-85.3\text{ m/s}^2$ 、 $a_y=-119.6\text{ m/s}^2$,仅为限值 200 m/s^2 的 $42.7\%\sim 59.8\%$,安全裕量充足。大型货车工况由于碰撞持续时间较长,乘员速度略高于其他两种工况($v_x=4.0\text{ m/s}$),但仍在限值以内。

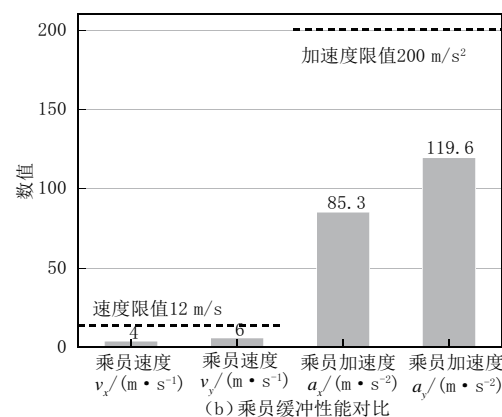
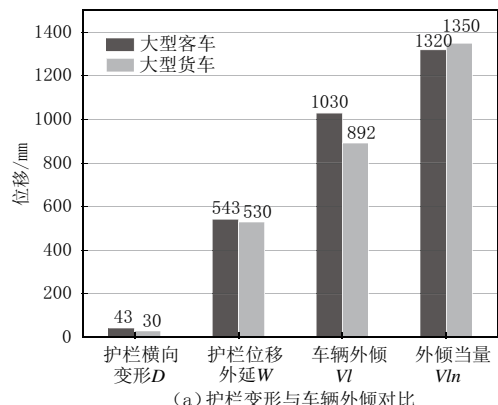


图7 碰撞仿真结果对比

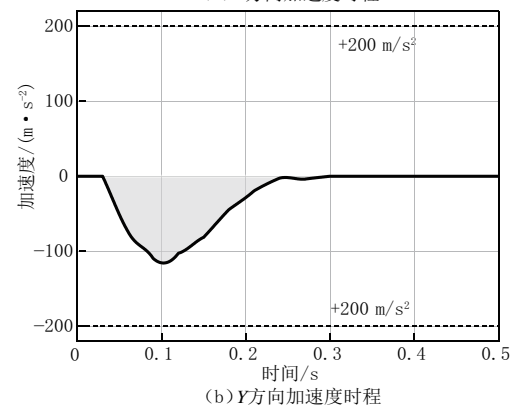
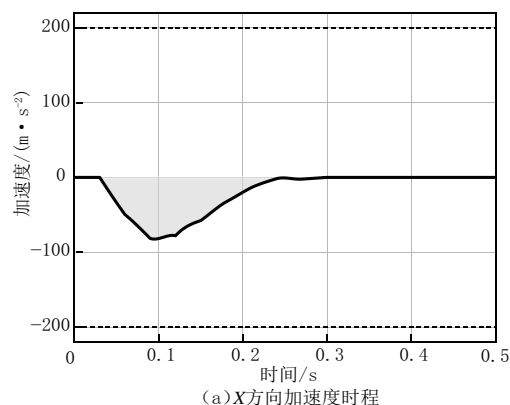


图8 碰撞仿真结果对比

从结构响应看,护栏最大横向变形出现在大型客车工况($D=43\text{ mm}$),卸载后残余变形很小,说明结构总体始终处于弹性工作状态。现浇接缝和铰缝在3种工况下的主拉应力均低于材料抗拉强度,竖向连

接和纵向连接均保持完好。

从能量耗散路径看,大型客车碰撞工况的总动能主要通过3个渠道耗散:护栏弯曲变形吸收约45%(护栏主体弹性变形+后浇带区域的局部损伤),车辆自身塑性变形约35%(车头压溃、车身扭曲),摩擦耗散约20%(车辆与护栏接触面的滑动摩擦)。大型货车工况因碰撞重心低、作用高度小,能量主要由护栏根部弯曲和车辆底盘变形吸收,耗散路径更为集中。小型客车工况则主要由车辆前部压溃变形耗散能量,护栏基本处于弹性范围。

铰缝应力分布分析显示:3种工况下铰缝最大主拉应力均出现在铰缝的转角(倒角2.0 cm×3.0 cm处),这是因为转角区域存在应力集中效应。大型客车工况铰缝应力0.492 MPa,仅为UHPC抗拉强度5.7 MPa的8.6%,安全裕量充足。碰撞角度增大可能进一步提高铰缝局部应力,需要通过参数化分析进一步量化其影响。

综上,推荐方案在3种典型碰撞工况下均表现出足够的安全裕量,结构设计和连接构造合理,可满足SS级防护要求。

3.6 与同等级装配式混凝土护栏实车试验的外部基准对比

对比文献^[22]的实车试验数据以检验本文仿真结果的合理性。文献^[22]的实车试验同样采用《公路护栏安全性能评价标准》(JTGB05-01—2013)^[19]中的SS级护栏要求进行评价,实车试验使用的车型、质量、碰撞速度和碰撞角度均与本文模拟条件接近。本文仿真结果与实车试验^[22]数据的系统级响应对比如表5所示。

可以看到,小型客车工况下的乘员碰撞速度和乘员碰撞后加速度处于相近量级,且均满足《公路护栏安全性能评价标准》(JTGB05-01—2013)^[19]的限值要求。大型客车和大型货车均被有效拦阻和导向,未发生穿越、翻越或骑跨护栏等防护功能失效现象。从结构功能状态看,两者均未出现影响护栏防护功能的整体性破坏。

从工况可比性和系统级响应两个层面看,本文有限元仿真结果未偏离同等级装配式混凝土桥梁护栏实车试验所反映的合理响应范围,可作为本文数值评估结果合理性的外部基准说明。

4 多方案综合比较

根据南宁建设工程造价信息,考虑施工费用占

表5 仿真结果与同等级实车试验系统级响应对比

项目	实车试验 ^[22] 数据	仿真结果	对比说明
小型客车乘员碰撞速度	最大值为6.6 m/s	最大分量为6.0 m/s	量级接近且均小于12 m/s限值
小型客车乘员碰撞后加速度	最大值为123.3 m/s ²	最大分量绝对值为119.6 m/s ²	量级接近且均小于200 m/s ² 限值
小型客车防护	平稳使出	车辆顺利导出	系统响应一致
大型客车防护	未发生穿越、翻越或骑跨	车辆被成功拦阻并导出	系统响应一致
大型货车防护	未发生穿越、翻越或骑跨	车辆被成功拦阻并导出	系统响应一致
结构功能状态	背部挡块未发生结构性损坏,碰撞区域存在少量微裂缝	大型客车工况下护栏顶部出现局部混凝土剥离,但结构整体保持完好;其它工况未见明显损伤	均未发生防护功能失效

总费用30%,标准段占比80%,非标准段20%,估算各方案造价如表6所示。推荐方案综合单价892元/m,较现浇方案的1018元/m低12.8%。桂林外环全线护栏总长约14.69万m(36.732 km×4),采用推荐方案可节约造价约1 921万元。

表6 各方案造价对比 单位:元/m

序号	方案	标准段	非标准段	综合单价
1	推荐方案	844	1 082	892
2	钢套筒连接	978	1 131	941
3	钢筋横向拼插	872	1 104	918
4	单坡形截面	846	1 054	887
5	现浇混凝土护栏	—	—	1 018

进一步地,四种装配式方案在施工可行性、安装精度、结构耐久性、安全性和经济性等方面的综合对比如表7所示。

表7 各方案造价对比

方案	主要优点	主要缺点
推荐方案	1.安装精度低,适应性强; 2.剪力铰施工快; 3.黏层砂浆可调标高; 4.双筋截面连接可靠耐久	1.局部需现场施工; 2.后浇带稍复杂
钢套筒连接	1.钢筋等强连接可靠; 2.有工程案例	1.精度要求高适应性差; 2.灌浆效率低; 3.曲线梁适应差; 4.造价高
钢筋横向拼插	1.精度要求低; 2.后浇带易操作	1.与沥青铺装刚度不匹配; 2.排水问题; 3.传力复杂; 4.大修耐久性差
单坡形截面	1.截面简单易预制; 2.精度低; 3.可调标高	1.刚度排水不匹配; 2.工序稍复杂; 3.大修易损
现浇护栏	1.工艺成熟; 2.连接可靠; 3.线形易调	1.质量不稳定; 2.速度慢; 3.工期长; 4.临空风险高

从安装精度看,方案1(钢筋错位拼插)和方案3、4(横向拼插)均提供了较大的安装容差(纵向30 mm、横向15 mm),而方案2(钢套筒)需要逐根套筒灌浆对位,精度要求苛刻,曲线梁段难以满足。

从耐久性看,方案1的双筋截面整体连接和UHPC剪力铰在3种碰撞工况下均保持完好,没有锈蚀隐患;方案2的钢套筒和方案3、4的横向后浇带位于桥面铺装层内,桥面大修时容易受损。方案3、4还存在后浇带与沥青铺装刚度不匹配及排水不畅的问题。

可见,推荐方案(钢筋错位拼插竖向连接+剪力铰纵向连接)在安装适应性、施工速度、耐久性和经济性方面综合最优,可作为桂林外环高速公路SS级装配式护栏的实施方案。

5 施工关键技术

5.1 预制与安装

设计护栏标准段预制长度为499 cm(较划分长度短1 cm),采用定型钢模板进行预制。钢筋骨架采用胎架加工并进行整体入模。混凝土采用泵送入模工法并进行分层浇筑振捣,浇筑后进行蒸汽养护。箱梁预制时采用定位尺控制预埋件的定位误差在1 mm以内,并确保复合时的误差在2 mm以内。预制护栏节段采用汽车吊进行吊装运输,在对准特征点平面位置后缓慢下放坐浆。下放后不得再次起吊,以确保砂浆的密实性。吊装到位后进行临时固定,可利用拼插钢筋局部焊接或辅助支架固定。

5.2 误差调整能力

纵向位置容差为30 mm,可通过钢筋错位进行调整。横向容差则为15 mm。标高误差通过调整坐浆层厚度调整(一般厚20 mm,可量15 mm)。当桥梁平曲线半径 ≥ 500 m时可以以直代曲进行直线预制,偏差不得超过5 mm。平曲线半径 < 500 m时需采用弧形模板进行护栏预制。非标准段护栏节段的划分长度需不小于400 cm,用于进行曲线段和伸缩缝处的尺寸调节。

5.3 存梁期上拱的影响

根据设计文件的要求,存梁期不宜超过90 d,存梁期间若累计上拱值超计算值10 mm需采取措施。20、30 m和35 m小箱梁反预拱值分别为-10、-20 mm和-25 mm。计算表明,35 m小箱梁存梁期从90 d延长至150 d时上拱值不超过7 mm,在施工误差可控范围内,对护栏安装标高的影响不大。

6 结 语

(1)本文提出了采用U型钢筋错位拼插竖向连接与纵向剪力铰组合的SS级装配式混凝土护栏方案。钢筋错位拼插提供了30 mm的纵向和15 mm的横向安装容差,黏层砂浆可在15 mm的范围内灵活调整标高,有效降低了对施工精度要求。建议钢筋错位间距 s 取 $5d$ (d 为钢筋直径),既保证安装容差空间,又确保握裹力充分发展;搭接长度 l_a 不宜小于 $35d$,与现行规范对受拉钢筋锚固长度的要求一致。

(2)结构承载力验算表明,护栏在端部和中部的横向承载力分别为601.0 kN和571.1 kN,均大于SS级护栏安全标准要求的 $F_t=520$ kN,具有9.8%~15.6%的安全裕量。同时,各连接部位的抗剪承载力也均满足规范要求。建议同类SS级护栏设计时,宜将安全裕量控制在10%~20%范围内。

(3)本文基于LS-DYNA建立了护栏-车辆耦合有限元模型,开展了3种车型的碰撞仿真分析。结果表明碰撞过程中3种车辆均被成功拦阻和导向,护栏最大横向变形 $D=0.043$ m(大型客车工况),乘员碰撞速度和加速度均在标准限值以内,3项安全评价指标均满足JTG B05-01—2013的SS级要求。建议在同类工程中,将大型客车(18 t)工况作为控制设计的标准碰撞工况。

(4)多方案综合比较表明,推荐方案在安装容差、施工速度和耐久性方面综合最优,综合单价892元/m,较现浇方案节约12.8%,全线可节省造价约1 921万元。

(5)预制主梁存梁期从90 d延长至150 d时上拱值不超过7 mm,对护栏施工影响可控,可不设置额外调整措施。

参考文献:

- [1] 赵伟.公路SAM级单坡型混凝土防撞护栏施工工艺[J].交通世界,2021(32):105-106.
- [2] 文明,徐标,熊朝晖,等.考虑锚固因素的护栏防撞性能参数敏感性分析[J].中国公路学报,2026,39(2):291-301.
- [3] 路迪.桥梁工程现浇混凝土防撞护栏外观质量影响因素及控制措施[J].建筑技术开发,2025,52(增刊1):45-49.
- [4] 刘刚.试论桥梁现浇钢筋混凝土防撞护栏外观及线形施工控制对策[J].四川水泥,2017(2):311.
- [5] JTG/T 3365-05—2022 公路装配式混凝土桥梁设计规范[S].
- [6] JTG/T 3654—2022 公路装配式混凝土桥梁施工技术规范[S].
- [7] 王黎静.预制装配式桥梁防撞护栏施工技术研究[J].科技资讯,2026,24(4):146-148.
- [8] 庄丛硕.装配式防撞护栏施工技术研究[D].太原:太原理

(下转第97页)