

新型装配式UHPC连接护栏构造优化分析

马恩高¹, 傅晨曦², 丁振留³, 李梦云³, 王自豪⁴, 李枝军⁴

(1. 中国建筑第七工程局有限公司, 河南 郑州 450004; 2. 华设设计集团股份有限公司, 江苏 南京 210014;

3. 江苏纬信工程咨询有限公司, 江苏 南京 210014; 4. 南京工业大学, 江苏 南京 211816)

摘要: 针对高速公路桥梁防护需求, 提出一种兼具高强度与缓冲性能的预制装配式组合护栏, 融合刚性护栏高承载与半刚性护栏吸能变形特性。基于LS-DYNA建立护栏—桥面板精细化有限元模型, 模拟SS级台车碰撞, 分析后浇材料强度、槽口形状尺寸及纵向连接钢筋参数对防护性能的影响。结果表明: 采用100 MPa UHPC后浇材料时, 护栏位移峰值降低18.6%, 残余位移减少39%; 250 mm×250 mm梯形槽口在材料用量与力学性能间较优; 纵向连接采用600 mm、 $\phi 16$ mm及以上HRB400钢筋时, 护栏与桥面板严重损伤单元比例可分别控制在11.4%和8.1%以下。优化方案可提升连接可靠性与整体防护性能, 并兼顾施工效率与经济性。

关键词: 预制护栏; 碰撞; 连接构造; 数值模拟

中图分类号: TU398.9

文献标志码:

文章编号: 1009-7716(2026)09-0241-07

Analysis on Structural Optimization of New Prefabricated UHPC Connected Guardrails

MA Engao¹, FU Chenxi², DING Zhenliu³, LI Mengyun³, WANG Zihao⁴, LI Zhijun⁴

(1. China Construction Seventh Engineering Division Corp., Ltd., Zhengzhou 450004, China; 2. China Design Group Co., Ltd., Nanjing

210014, China; 3. Jiangsu Weixin Engineering Consulting Co., Ltd., Nanjing 210014, China; 4. Nanjing Tech University, Nanjing

211816, China)

Abstract: To address the protection requirements of expressway bridges, a prefabricated assembled composite guardrail with both high strength and buffering capacity is proposed, which integrates the high load-bearing capacity of rigid guardrails with the energy-absorbing deformation characteristics of semi-rigid guardrails. A refined guardrail-bridge deck finite element model is established on LS-DYNA to simulate the collision of SS-class trolleys and analyze the effects of post-cast material strength, slot geometry and size, and longitudinal connecting reinforcement parameters on protective performance. The results indicate that the use of 100 MPa UHPC post-cast material can reduce the peak displacement and residual displacement of the guardrails by 18.6% and 39%, respectively. A trapezoidal slot with dimensions of 250 mm × 250 mm achieves a favorable balance between material consumption and mechanical performance. When 600 mm, $\phi 16$ mm and above HRB400 steel bars are used for longitudinal connection, the proportion of severely damaged units between the guardrail and the bridge deck can be controlled below 11.4% and 8.1% respectively. The optimized scheme can improve the connection reliability and overall protective performance while considering the construction efficiency and economic benefits.

Keywords: precast guardrail; collision; connecting structure; numerical simulation

0 引言

近年来,为提升连接强度、简化安装、增强能量吸收能力及提高耐久性,研究人员开发了多种新型装配式护栏连接构造。国内已有多个工程实践案

例,如上海S7公路、沿江通道匝道高架桥及内环高架等,均采用节段预制混凝土防撞护栏,并通过UHPC后浇带实现与桥面板的连接。这类护栏施工效率高,现场通过连接构造或局部后浇完成整体装配。混凝土刚性护栏在碰撞中不易移动变形,维修量小、经济性好,但外形单一、景观效果差,且对车辆损伤较大。半刚性护栏则能吸收更多冲击能量,减轻车辆损伤,但伴随较大变形与位移。已有学者对预制拼装混凝土护栏的连接构造进行了初步探索与创新。朱玉等^[1]基于工程实践经验,提出了一种优

收稿日期: 2026-03-04

作者简介: 马恩高(1989—),男,本科,工程师,从事桥梁工程工作。

通信作者: 李枝军(1978—),男,博士,学科教授,从事桥梁工程工作。电子邮箱: lizhijun@njtech.edu.cn

化的节段护栏与桥面板连接方案,采用后浇高强灌注浆料的梯形连接槽口结构,最终设计出一种符合SA级防撞标准的节段拼装护栏连接体系。邵虎等^[2]在纵向采用钢结构连接实现预制护栏的节段连接,同时在竖向利用后浇灌注浆料连接护栏与桥面板。经过台车试验验证,这种连接方式下的护栏整体防撞效果表现出色,为桥梁护栏的纵向连接提供了新的解决方案。李景丰^[3]聚焦纵向节段护栏的连接方式,通过试验验证了采用共用立柱连接板方案的可行性。周劲宇等^[4]针对传统桥梁护栏施工难度大、自重较重等问题,提出了一种采用倒U形钢截面拼接的新型连接构造,发现这种预制护栏的极限承载力达到了传统护栏的1.5倍,同时峰值位移仅为传统护栏的0.5倍,展现出了卓越的防撞性能。王海渊等^[5]针对传统桥梁护栏施工效率低下的问题,开发了一种具有装配化施工特性的梁柱式混凝土护栏系统,并对提出的护栏系统进行了台车碰撞试验。试验结果表明:该新型护栏在极限承载力和能量吸收性能方面均能达到现行规范要求,其动态变形控制指标优于传统现浇护栏。

综上所述,尽管国内外学者已对预制装配式护栏与桥面板的连接方式进行了初步探索,但目前广泛采用的连接方式仍面临施工精度高、连接区混凝土易开裂、连接刚度不足等挑战。尽管研究表明采用UHPC作为连接材料的预制护栏在防撞性能方面表现优异,但在车辆撞击机理及局部破坏机制方面的研究仍较为缺乏。因此,未来需进一步优化连接构造,并加强对护栏抗撞性能的机理研究,以提升其安全性与可靠性。基于此,本文以单节预制护栏底座为对象,通过台车正向撞击试验模拟车辆撞击过程,重点分析UHPC强度等级、后浇带区域槽口尺寸、连接钢筋长度与直径等关键参数对连接性能的影响,探索最优参数组合,旨在提升连接构造的可靠性与安全性。

1 新型装配式护栏构造

本研究基于现有研究与工程案例调研,从受力特点、施工效率、经济性等关键要点出发,提出了一种采用UHPC后浇连接的公路桥梁预制装配式组合护栏,护栏高度主要依据《公路交通安全设施设计规范》(D81—2017)及已有实车足尺碰撞试验中车辆实际结构尺寸进行选取,规范^[6]要求SS级混凝土护栏的高度不低110 cm,组合式护栏可在此基础上增加

10 cm。因此,本护栏整体高度设置为120 cm,节段长度设置为6 m,如图1所示。此设计结合了刚性护栏与半刚性护栏的优势,且开口式后浇带在施工过程中便于连接钢筋的绑扎,工程造价处于适中水平。

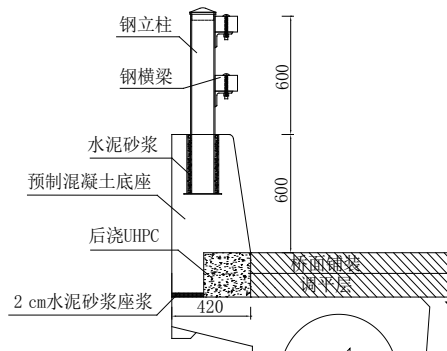


图1 护栏横断面构造(单位:mm)

1.1 护栏下部刚性结构

下部主要包括底座、后浇带和座浆,混凝土底座设置高度为60 cm,采用单坡型样式,倾斜角 9° ,底面宽420 mm。此高度能确保包括大型货车在内的车辆碰撞时首先接触混凝土部分,有效吸收大部分初始能量。对于混凝土底座材料的选取,根据规范^[7],高速公路、一级公路混凝土强度等级不应低于C30,但考虑到本研究预制护栏的安全防护等级为六级,根据规范^[8]中装配式护栏普遍采用C50混凝土以平衡强度和耐久性,可提供较高的强度和韧性,以满足护栏与桥面板连接处的荷载传递和耐久性要求。尽管C50混凝土成本和施工要求略高,但可缩小构件截面,降低裂缝风险,提高防护性能。因此,混凝土底座选取C50,钢筋选择HRB400。

1.2 护栏上部柔性结构

上部钢结构包括横梁和立柱,选取矩形管立柱作为上部钢结构护栏的立柱形式。尺寸设置为(130×130×6.0)mm,横梁选用两根矩形截面横梁(120×80×3.5)mm,与矩形立柱焊接,使上部结构稳定性更优。其中,上部钢结构与下部混凝土底座之间采取直接埋入的方式连接,护栏上部钢结构横梁通过套管的形式与相邻护栏进行连接。钢结构材料依据《公路波形梁高强钢护栏设计规范》(DB32/T 4512—2023)选取HR700F型钢材。

2 护栏有限元模型

2.1 材料本构

(1)钢筋材料本构模型。钢筋的本构模型采用双线性弹塑性模型(*MAT_PLASTIC_KINEMATIC),

具体参数设置如表 1 所示。

表 1 HRB400 钢筋参数标定					
钢筋类别	P/s^{-1}	C	ET/MPa	ε_{cu}	E/GPa
HRB400	228 849	7.043	1 100	0.156	200

(2)混凝土材料本构模型。混凝土模型采用 CSCM 模型。CSCM 模型的核心在于一个创新的屈服面方程,该方程依据三个核心应力不变量构建,从而能够精确描绘混凝土在多样应力环境下的力学表现。尤为突出的是,该模型采纳了一个平滑过渡的设计,将剪切屈服面与硬化帽盖面完美融合,如图 2 所示。这一设计极大提升了模型在模拟混凝土复杂应力响应时的精确度。

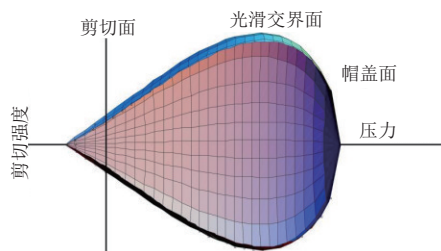


图 2 CSCM 模型屈服面

(3)钢结构材料本构。护栏上部钢结构立柱、横梁、套管均采用 *MAT_PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY 模型。此模型在 LS-DYNA 中应用广泛,常用于模拟金属材料的弹塑性行为。钢结构材料参数如表 2 所示。

表 2 钢结构材料参数				
名称	密度/ ($kg \cdot m^{-3}$)	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	泊松比
材料参数	7 860	210	700	0.26

2.2 撞击加载方式与边界条件

相关研究人员根据多次项目经历将实车撞击试验的损坏情况与台车试验进行了比照,指出了台车试验碰撞条件与护栏防撞等级的对应关系^[1,3],如表 3 所示。另外,根据规范规定^[6],桥梁 SS 级护栏的汽车横向碰撞荷载分布长度为 2.4 m。本研究中,冲击体质量取 2 t,速度为 30 km/h,冲击宽度为 2.4 m。考虑到常规小客车、大客车和货车的保险杠高度分别为 36、42 和 60 cm,碰撞加载位置定于高度 60 cm 的护栏标准段中点位置。本研究分为竖向构造与纵向构造两个部分,分别展开分析与探讨。其中,竖向构造部分以单节预制护栏为模型进行有限元分析。

预制护栏通过桥面板的预埋钢筋与预制混凝土底座通过后浇 UHPC 实现连接(见图 3)。相关研究人员^[9]对 UHPC 与普通钢筋混凝土结构界面抗剪性能进行了研究,通过破坏性试验发现破坏多发生在

表 3 碰撞条件与护栏防护等级的对应关系				
碰撞车型	碰撞速度/ ($km \cdot h^{-1}$)	碰撞角度/ ($^{\circ}$)	车辆质量/t	防撞等级
台车	20	90	2	SA(400kJ)
台车	30	90	2	SS(520kJ)

普通混凝土层,UHPC 与普通混凝土的界面黏结强度通常高于普通混凝土自身的强度。而且装配式 UHPC 结构的自重可降低至传统结构的 40% ~ 50%^[10]。因此,本模型将预制护栏、高强混凝土后浇带及桥面板底板通过共节点方式进行连接模拟;同时,通过设置带摩擦系数的面面接触来模拟座浆层与预制护栏及底板之间的相互作用,并在底板底部施加固定约束条件(见图 4)。

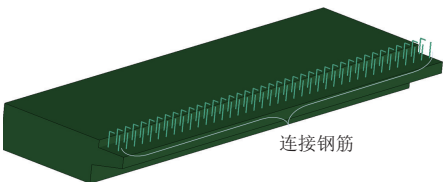


图 3 连接钢筋示意图

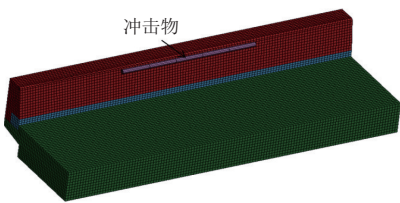


图 4 有限元模型

3 竖向连接构造研究

3.1 后浇带材料强度对护栏防撞性能的影响

为研究后浇连接材料强度对预制护栏防护性能的影响,分别建立强度等级为 100、120、150 MPa 的 UHPC 混凝土,并与强度等级为 C60 混凝土参照模型进行对比,通过冲击荷载下的位移响应评估连接性能。

3.1.1 护栏位移响应对比分析

采用 C60 混凝土与不同强度等级 UHPC 进行竖向连接时护栏底座的位移响应如图 5 和表 4 所示。结果表明,C60 混凝土后浇连接因抗剪能力弱,在冲击下表现出大位移和长振动的劣性,峰值与残余位移分别比 UHPC(100 MPa)高出 18.6% 和 39%;将 UHPC 强度从 100 MPa 提升至 150 MPa,位移响应曲线却高度接近,表明继续提高强度对性能提升收效甚微。

3.1.2 护栏损伤程度分析

从损伤云图(见表 5)可以发现,后浇带材料采用高强混凝土 C60 和超高性能混凝土 UHPC 时,损伤情况有较大差异,具体体现在以下几个方面:

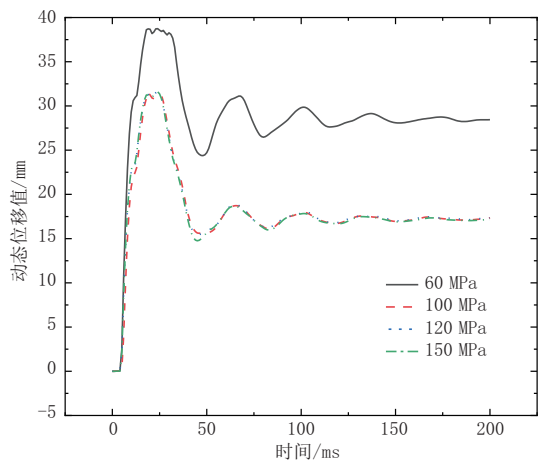


图5 不同连接材料下护栏底座的位移时程曲线

表4 不同连接材料下护栏底座的位移响应对比

连接材料	上升段 时间/ms	位移峰值/ mm	震荡段时间/ ms	残余位移/ mm
C60	0 ~ 25	38.74	56 ~ 116	28.45
UC100	0 ~ 20	31.52	49 ~ 103	17.36
UC120	0 ~ 20	31.30	48 ~ 101	17.34
UC150	0 ~ 19	31.24	49 ~ 99	17.17

采用C60 高强混凝土作连接材料时,护栏底座在迎撞面上出现了大面积的损伤,损伤区域的形状特征为倒梯形且出现了明显的向护栏两侧外延的趋势,在护栏背部产生的损伤也较为严重。

采用UHPC作连接材料时,护栏底座在迎撞面上的损伤程度显著降低,损伤区域范围整体上呈现为一个倒梯形,并且没有出现向护栏两侧延伸的现象。从护栏背面来看,采用UHPC作为连接材料的护栏损伤程度也相对较低。同时,从损伤云图中可以看到,采用更高强度等级的UHPC作连接材料时,护栏底座的损伤程度并没有出现明显降低。

表5 不同强度的连接材料下护栏底座损伤对比

连接材料	正视图(迎撞面)	后视图	侧视图
C60			
UC100			
UC120			
UC150			

总之,采用不同强度等级的UHPC对护栏的位移

响应影响不大,损伤程度较C60后浇材料而言降幅明显,连接强度可靠。因此,建议选择UC100为后浇带的连接材料。

3.2 槽口尺寸对护栏防撞性能的影响

根据相关规范,将预制护栏底座宽度取为420 mm,如图6(a)所示为矩形槽口,记为JX-i;如图6(b)所示为梯形槽口,记为TX-i。其中,i为工况序号。本节分别以矩形和梯形槽口为模型,研究槽口宽度与高度对护栏受力的影响。模型设计以25 mm为梯度,矩形槽口设4个宽度(高度固定225 mm),梯形槽口设4个迎撞面高度(宽度与背面高度固定225 mm),并与现浇底座模型进行对比。具体计算工况如表6所示。

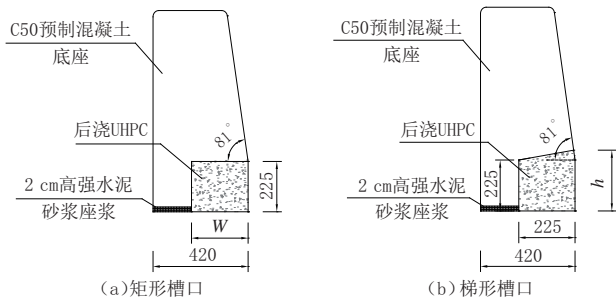


图6 槽口形状示意图

通过对比护栏的动态位移响应和护栏的损伤程度,来分析槽口尺寸对护栏防护性能的影响,探索槽口尺寸的合理取值范围。

3.2.1 护栏动态位移响应分析

由图7和表7可知,当矩形槽口宽度从225 mm增加到250 mm时,护栏底座顶部的位移峰值降幅最大,达到了2.84%。此时,预制护栏底座顶部的位移峰值与C50现浇式混凝土底座相比降低了14.3%,残余位移下降了31.4%。此后,随着槽口宽度继续以25 mm的梯度增加,护栏动态位移峰值的降幅最大仅为0.89%。同时,当梯形槽口高度从225 mm增加到250 mm时,护栏底座顶部的位移峰值降幅最大,达到了4.70%。此时,预制护栏底座顶部的位移峰值与C50现浇式混凝土底座相比下降了14.1%,残余位移下降了31.4%。此后,随着槽口高度继续以25 mm的梯度增加,护栏动态位移峰值降幅最大仅有1.82%。

3.2.2 护栏损伤分析

由于当槽口宽度和高度从250 mm增加时,护栏的损伤程度下降得并不显著,因此为节约篇幅,仅将JX-1、TX-1和C50现浇式混凝土底座的损伤对比情

表6 槽口尺寸参数计算工况

计算工况	JX-1	JX-2	JX-3	JX-4	TX-1	TX-2	TX-3	TX-4
槽口尺寸/mm	225×225	225×250	225×275	225×300	225×225	250×225	275×225	300×225

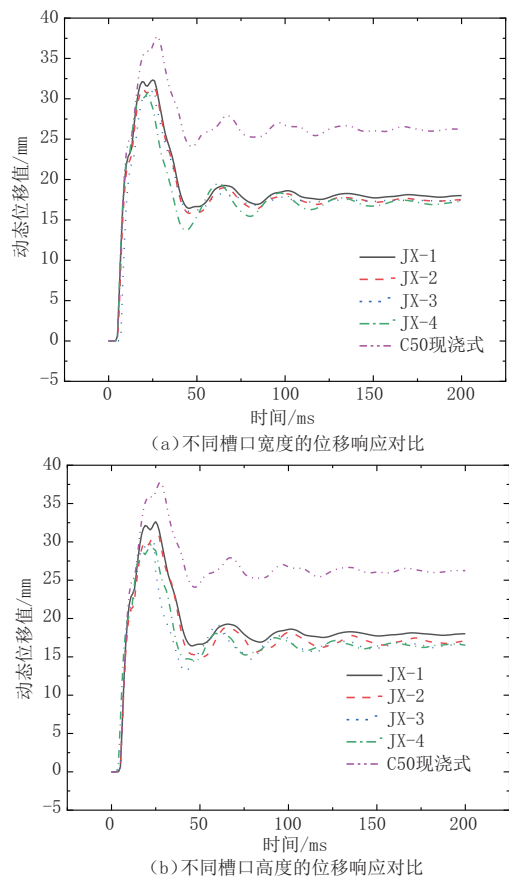


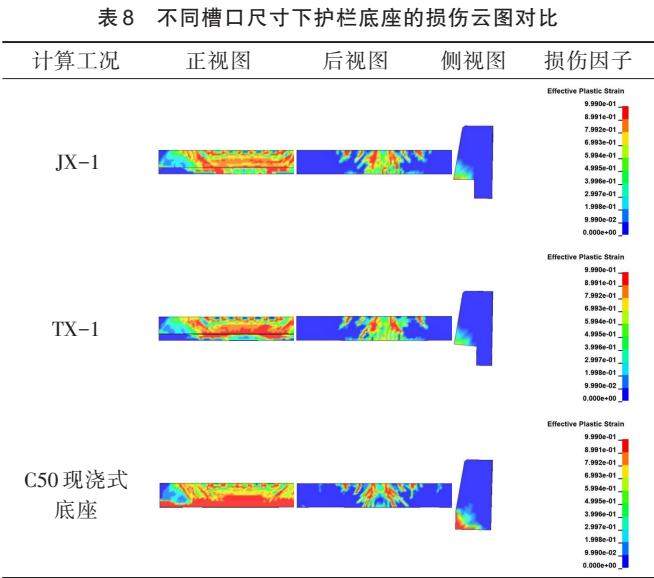
图7 不同槽口尺寸的位移响应对比

表7 不同槽口尺寸下位移响应对比

计算工况	位移峰值/ mm	下降 比例/%	残余位移/ mm	下降 比例/%
JX-1	32.34	—	18.01	—
JX-2	31.42	2.84	17.60	2.28
JX-3	31.14	0.89	17.41	1.08
JX-4	30.93	0.67	17.29	0.69
TX-1	32.41	—	18.01	—
TX-2	30.82	4.70	17.10	5.05
TX-3	30.26	1.82	16.71	2.28
TX-4	29.72	1.79	16.51	1.20
C50 现浇底座	37.74	—	26.25	—

况列于表8。

将预制护栏底座和现浇式护栏底座的损伤分布情况进行对比,可以发现,预制装配式混凝土底座的损伤区域大致呈现出一个倒置的梯形,呈现出倒梯形破坏;而现浇式混凝土护栏的梯形损伤区域范围更大,并且损伤区域扩散至护栏节段两端,呈现出整体推倒式破坏。究其原因,主要是C50现浇式混凝土底座与桥面板连接处的强度与预制装配式护栏相比小很多,仅撞击区域下部的钢筋混凝土不足以抵抗冲击作用产生的弯矩与剪力作用,因此损伤区域扩散至护栏节段的两端。这正说明了采用UHPC后浇连接的预制护栏底座的抗撞性能优于相同条件下



的现浇式底座,具有更高的安全余量。

同时将矩形槽口与梯形槽口的损伤云图进行对比,可以发现,两个不同槽口形状的护栏损伤分布非常相似,都呈现为一个倒梯形分布,说明矩形槽口和梯形槽口在尺寸相同的情况下,护栏的损伤程度较为接近,进一步说明了后浇带主要依靠迎撞面强度来抵抗冲击作用。

综上所述,UHPC凭借出色的变形恢复能力使预制护栏底座的位移响应得到了显著降低,提升了护栏的防撞性能。同时可以看到,当槽口宽度和槽口高度从250 mm继续增加时,护栏位移响应的降幅开始减缓。此外,采用梯形槽口时,后浇带的UHPC用量少于矩形槽口。因此,本研究将后浇带槽口确定为宽度为250 mm、高度(迎撞面)为250 mm的梯形槽口。

4 纵向连接构造参数化分析

纵向连接构造主要分析了钢筋的连接长度和直径,首先在后浇带设置连接钢筋(直径10 mm),如图8所示,通过绑扎与纵向钢筋连接。为分析锚固长度的影响,建立了长度从400 mm至800 mm(梯度50 mm)的系列模型,以研究其对护栏整体受力性能的作用。具体计算工况如表9所示,工况名称记为LJ-a,a为连接钢筋长度。

通过图9、图10可以发现,设置纵向连接钢筋能显著改善结构损伤。未设钢筋时,节段接缝处出现区域性损伤,护栏与桥面板的严重损伤单元(损伤因子≥0.799)占比分别高达25.9%和18.5%。而在设置直径10 mm、长400 mm的连接钢筋后,二者严重损伤

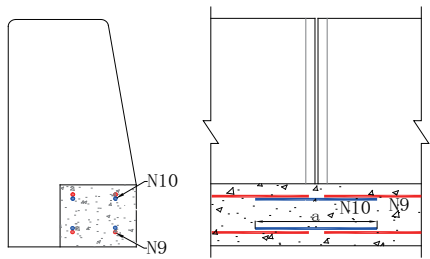


图8 纵向连接构造示意图

单元的占比分别显著降至18.7%与10.7%,证明该措施有效抑制了损伤的发展。

当连接钢筋长度增加时,护栏与桥面板的损伤程度逐渐下降,各个工况下混凝土严重损伤单元占比情况如图10所示,对其采用指数函数拟合后,可以发现,连接钢筋设置与否对护栏和桥面板的损伤

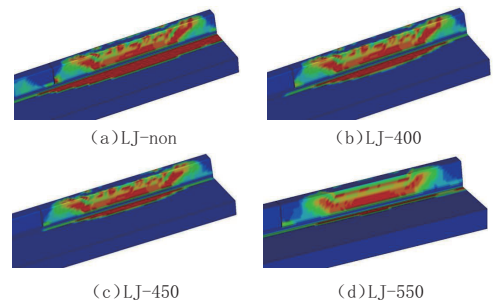


图9 不同纵向钢筋长度下护栏损伤程度对比

程度影响显著。随着连接钢筋长度从400 mm增加至600 mm,受撞护栏的损伤单元占比从18.7%降至11.4%。此后,当连接钢筋长度进一步增加时,混凝土损伤单元的占比变化不大。因此,建议将纵向连接钢筋长度设置为600 mm。

表9 纵向连接钢筋长度计算工况

计算工况	LJ-non	LJ-400	LJ-450	LJ-500	LJ-550	LJ-600	LJ-650	LJ-700	LJ-750	LJ-800
连接钢筋长度/mm	—	400	450	500	550	600	650	700	750	800

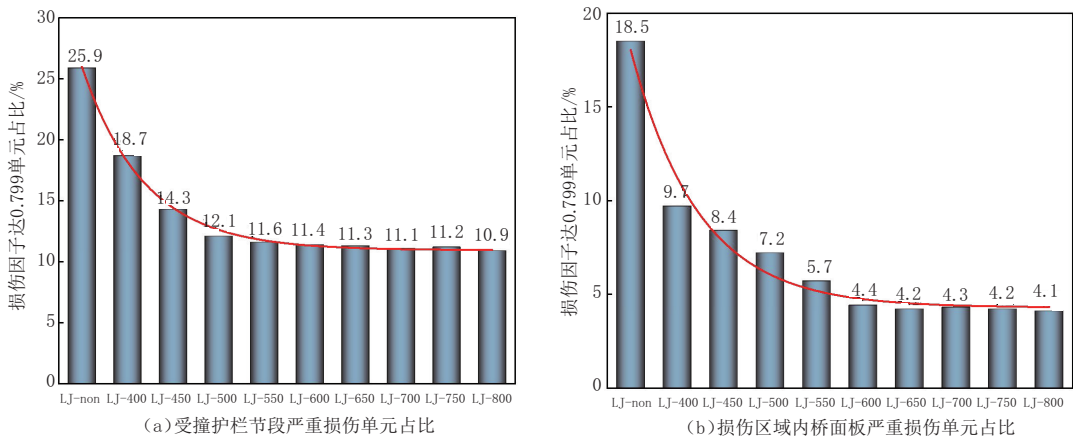


图10 不同纵向连接钢筋长度下严重损伤单元占比

此外,考虑到纵向连接钢筋直径对接缝处的单元应力有一定影响,将纵向连接钢筋的直径作为参数,分别以10、12、14、16、18、20 mm为纵向连接钢筋直径进行了建模计算,并与不设置纵向连接钢筋时接缝处的单元应力进行了对比,如图11所示。从图

11(b)可以看出,采用不同的直径作纵向连接钢筋时,接缝处单元的最大主应力时程趋势非常相似,接缝处单元的最大主应力随着纵向连接钢筋直径的增大而逐渐减小。

综上所述,在后浇带区域设置连接钢筋后,损伤

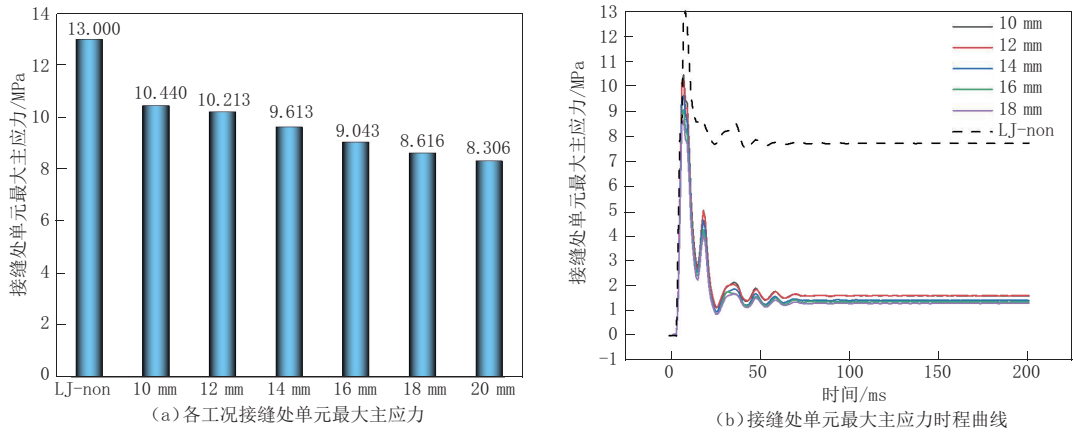


图11 连接钢筋直径对接缝处单元应力的影响

程度大有改观。损伤程度随着连接钢筋长度的增加进一步下降,当连接钢筋长度增加至 600 mm 后继续加长连接钢筋,对护栏及桥面板的受力性能影响较小。在结构设计时,考虑 1.4 的材料安全系数,将接缝处 UHPC 的最大主应力控制在 9.3 MPa。因此,建议将纵向钢筋长度设置在 600 mm;考虑到安全系数,钢筋直径不小于 16 mm。

5 结 论

本文对 UHPC 后浇式预制护栏,从后浇带材料强度等级、槽口尺寸、纵向连接钢筋直径和长度为参数分析了护栏性能的影响,主要结论如下:

(1)采用不同强度等级的 UHPC 对护栏的位移响应影响不大,但损伤程度较 C60 后浇材料降幅明显,连接强度也可靠。因此,建议选择 UHPC100 为后浇带的连接材料。

(2)UHPC 凭借出色的变形恢复能力使护栏底座的位移响应得到了显著降低,提升了护栏的防撞性能。对于不同的槽口尺寸,护栏位移响应的降幅开始减缓。此外,由于采用梯形槽口时后浇带的 UHPC 用量少于矩形槽口。因此,后浇带槽口确定为宽 250 mm、

高 250 mm 的梯形槽口。

(3)纵向连接作为保证护栏节段整体性的重要措施,同样需要得到重视。考虑增设纵向连接钢筋,通过多工况对比,建议设置长度为 600 mm、直径不小于 16 mm 的 HRB400 钢筋作为纵向连接钢筋。

参考文献:

- [1] 朱玉,荆坤,马燕翔,等.SA 级组合式桥梁护栏锚固连接槽口研究[J].公路,2020,65(10):268-271.
- [2] 邵虎,梁亚平,李雷,等.装配式组合型桥梁护栏关键技术研究[J].公路,2021,66(1):240-243.
- [3] 李景丰,贺志昂,樊智勇,等.SA 级装配式护栏纵向连接结构研究[J].公路,2020,65(8):291-294.
- [4] 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):254-259.
- [5] 王海渊,顾赛男,贺志昂,等.路侧高等级梁柱式混凝土护栏防护性能研究[J].公路,2020,65(3):210-214.
- [6] JTG D81—2017 公路交通安全设施设计规范[S].
- [7] JTG B05-01—2013 公路护栏安全性能评价标准[S].
- [8] JTG/T 3911-01—2021 装配化工字组合梁桥通用图[S].
- [9] 王兴旺.UHPC 与普通钢筋混凝土结构界面抗剪性能研究[D].湖南大学,2016.
- [10] 邵旭东,邱明红.基于 UHPC 材料的高性能装配式桥梁结构研发[J].西安建筑科技大学学报(自然科学版),2019,51(2):160-167.

(上接第 231 页)

不同的桥梁拼宽形式,进行了优缺点对比分析。

(2)根据 S32 公路现状桥梁不同位置的结构特点,选用了适宜的拼宽结构和连接方式。对跨径对齐的简支结构,采用 UHPC 对上部结构进行连接;对跨径错开的连续结构,采用结构不连接,并设置聚氨酯拼缝的形式。此外还对拼宽结构进行了特殊设计,控制新老桥位移差,保证了使用性能和结构安全。

(3)下部结构设计选用预制拼装工艺,设计标准化、预制工厂化和施工装配化,并采取了桩底注浆等工艺,以减小新老桥沉降差,确保工程质量。

参考文献:

- [1] 上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司.A15 公路工程施工图设计文件[Z].2006.
- [2] 冯志强.公路桥梁拼宽设计方式与施工技术研究[J].工程设计,

2025(12):192-194.

- [3] 袁青峰.复杂工况下的桥梁拼宽构造研究[J].城市道桥与防洪,2023(12):146-149.
- [4] 徐海明.旧桥梁拓宽的要求及方法[J].交通世界,2012(5):264-265.
- [5] 赵蒙.弹性混凝土拼缝在桥梁拼宽中的应用[J].城市道桥与防洪,2025(1):269-272.
- [6] 黄巍峰.新型刚接空心板桥梁应用与技术指标分析[J].城市道桥与防洪,2016(5):227-229.
- [7] 李静.新老结构间超高性能混凝土拼宽接缝技术研究[J].城市道桥与防洪,2022(9):228-232.
- [8] 陈浩.高速公路空心板梁桥拼宽受力分析[J].交通世界,2024(10):155-161.
- [9] 袁青峰.城市桥梁新型拼接缝设计与施工方法研究[J].城市道桥与防洪,2024(7):95-98.
- [10] 叶嘉豪.独柱墩桥梁抗倾覆验算及抗倾覆加固处治措施[J].道路桥梁,2019(8):142-144.
- [11] 齐新.桥墩预制装配连接技术特点与应用[J].城市道桥与防洪,2020(8):89-93.