

UHPC薄壁复合结构提升改造混凝土护栏的技术研究及应用

俞楠¹, 李应根¹, 李志勇¹, 罗征²

(1. 宁波市交通规划设计研究院有限公司, 浙江 宁波 315000; 2. 浙大宁波理工学院, 浙江 宁波 315000)

摘要: 钢筋混凝土护栏是重要的安全防护结构, 随着材料劣化及设计标准的提高, 大量现有混凝土护栏已不满足现行规范要求, 亟须提升改造。为了克服传统护栏改造方式的弊端, 提出了一种新型装配式UHPC薄壁复合结构提升既有混凝土护栏防撞能力的改造方案, 其中复合结构由UHPC阻裂防溃层和EPS泡沫混凝土能耗层组成, 充分结合了UHPC高强、高韧、高耐久特性及EPS泡沫混凝土的吸能效应。通过实车足尺碰撞试验及实际应用, 均验证了该方案的可行性和有效性, 可供类似护栏提升改造设计参考使用。

关键词: 混凝土护栏; 提升改造; 预制装配; UHPC/EPS复合结构

中图分类号: U445.7

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2025)04-0295-05

Research and Application of UHPC Thin-wall Composite Structure in Upgrading and Reconstruction of Concrete Guardrail

YU Nan¹, LI Yinggen¹, LI Zhiyong¹, LUO Zheng²

(1. Ningbo Transportation Planning and Design Institute Co., Ltd., Ningbo 315000, Zhejiang, China; 2. Ningbo College of Technology, Zhejiang University, Ningbo 315000, China)

Abstract: Reinforced concrete guardrail is an important safety protection structure. With the deterioration of materials and the raising of design standards, a large number of existing concrete guardrails have not met the requirements of the current norms, and it is in urgent need of upgrading and reconstruction. To overcome the drawbacks of the traditional guardrail reconstruction methods, a new assembled UHPC thin-wall composite structure reconstruction scheme for upgrading the collision capacity of the existing concrete guardrail is proposed, in which the composite structure consists of a UHPC crack-resistance and anti-collapse layer and an EPS foamed concrete energy consumption layer, and fully combines the high strength, high toughness and high durability of UHPC and the energy absorption effect of EPS foamed concrete. The feasibility and effectiveness of the scheme are verified by the full scale crash test and practical application, which can be referred for the upgrading, reconstruction and design of the similar guardrails.

Keywords: concrete guardrail; upgrading reconstruction; prefabricated assembly; UHPC/EPS composite structure

0 引言

根据统计资料, 在高速公路交通事故中, 车辆与高速公路护栏接触(碰撞、刮擦等)或者直接冲出道路的情况占30%, 由此造成的特、重大恶性交通事故占该类事故总数的比例在62%以上^[1-2], 故护栏安全性至关重要。部分早期建设的高速公路桥梁, 其护

栏防撞面以及高度均难以满足现阶段高速公路护栏防撞等级性能安全要求^[3-4]。传统的改造方式往往采用护栏加高、拆除重建等方式^[5-6], 存在安全风险大、工期长、废料多、造价高等问题。本文提出一种装配式UHPC薄壁复合结构提升既有混凝土护栏的改造方案, 无须拆除既有护栏, 且施工便捷, 并在宁波市杭州湾跨海大桥南岸连接线护栏提升改造工程中成功应用, 可为类似项目提供参考。

1 工程概况

宁波市杭州湾跨海大桥南岸连接线某桥跨径布置为3×20 m, 上部结构型式为简支空心板梁, 下部采用柱式墩台、桩基础, 公路设计速度120 km/h, 桥涵

收稿日期: 2024-07-03

基金项目: 宁波市交通运输科技项目(202302); 宁波市公益类科技计划项目(2023S178)

作者简介: 俞楠(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁与隧道工程研究工作。

通信作者: 李志勇(1980—), 男, 本科, 教授级高级工程师, 从事桥梁与隧道工程研究工作。电子邮箱: 14556645@qq.com

设计荷载采用汽—20,挂车—100。

杭州湾跨海大桥南接线于2007年建成通车,建设期根据相应规范,桥梁护栏采用上部带钢扶手的钢筋混凝土组合式护栏。随着新规范的实施,早期建设的混凝土护栏高度及迎撞面形状均不满足现行规范要求,同时部分护栏混凝土表面已出现锈胀露筋等病害(见图1),影响结构耐久性及路域美观性,故需要对该桥防撞护栏进行改造设计。

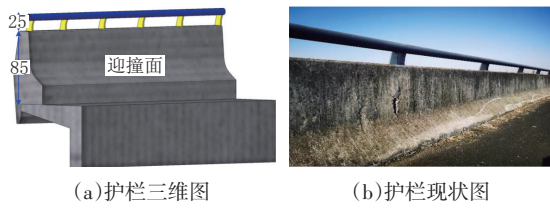


图1 护栏构造及现状照片

2 加固设计

2.1 传统护栏改造方案分析

针对上述问题,传统的护栏改造方式往往采用护栏加高、拆除重建等方式,如图2所示。这两种方式均能提升护栏防撞能力,但必须同时兼顾桥梁主体结构及桥面板结构的承载能力。护栏结构刚度过大,传递的碰撞力也就越大,对桥梁主体结构受力是不利的,因此当原结构承载能力不满足增大的护栏恒载和碰撞荷载要求时,还需要对原结构进行加固处理,故采用传统方案往往存在工期长、废弃工程量大、安全隐患高等问题,对高速公路正常运营影响较大。

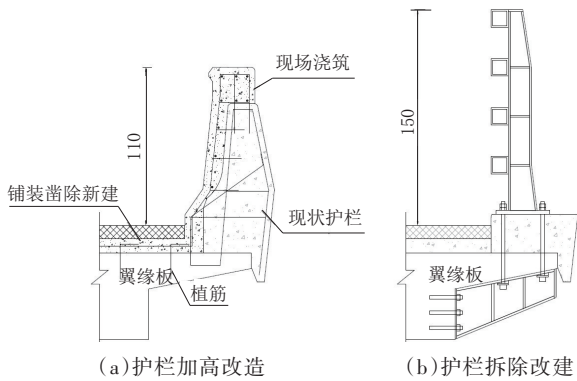


图2 桥梁护栏传统改造方式(单位:cm)

现将传统护栏改造方案与本文提出的UHPC复合加固方案进行对比分析,结论为:UHPC复合加固方案施工速度快、后期维护方便,且经济性好(见表1)。

2.2 加固机理分析

根据前期护栏研究工作及工程改造经验,可得既有混凝土护栏加固改造的3个关键点:一是车辆

表1 既有混凝土护栏提升方案比较表

方案简介	护栏加高	拆除新建金属梁柱式护栏	UHPC复合加固
施工步骤	拆除钢扶手,凿除护栏根部及桥面铺装,混凝土表面清理凿毛,在原护栏及桥面板植筋,绑扎钢筋后立模浇筑混凝土	拆除钢扶手,将现状混凝土护栏上半部分分割除,翼缘板下方安装钢牛腿进行加固,上下对穿螺栓安装金属梁柱式护栏,钢构件防腐涂装	拆除钢扶手,混凝土表面清理凿毛,底部开槽,安装UHPC预制护板,灌注轻质消能材料
工期 (100 m所需天数)/d	15	6	3
后期维护	损伤后不可更换,修复难度大	损伤后可更换,钢结构需要定期防腐涂装	损伤后可快速更换,后期维护费用低
综合单价/ (元·m ⁻¹)	1 800	3 300	1 300

的阻挡与引导,降低事故影响面;二是碰撞力的传递与扩散,避免局部应力集中;三是碰撞能量的转换与稀释,保护桥梁主体结构。加固技术原理见图3。

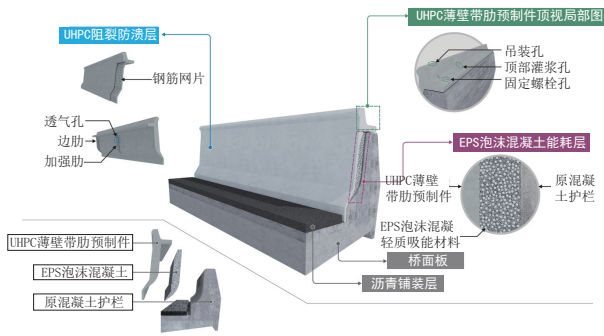


图3 加固技术原理图

基于此,本文提出了一种以UHPC阻裂防溃层、EPS泡沫混凝土能耗层组合而成的具有功能梯度的复合结构,通过在既有混凝土护栏内侧安装UHPC预制薄壁护板,利用UHPC高强、高韧、高耐久特性形成硬壳防护层^[7-8],有效引导车辆驶回车道且扩散撞击力。然后,利用在护板与旧护栏之间空腔内的EPS泡沫混凝土轻质消能材料吸收能量,减小车辆撞击对原混凝土护栏及桥面板产生的内力,从而实现在提升护栏防撞能力的同时最大限度保护并利用原结构。

2.3 结构设计

根据本文第2.2节所述,本次设计采用UHPC薄壁复合结构提升既有混凝土护栏改造方案,具体步骤如图4所示。

步骤1:切除钢扶手,对原护栏表面进行清洁处理,若有破损,采用聚合物砂浆修复。

步骤2:在路面边缘、护栏下端的位置开槽,开槽

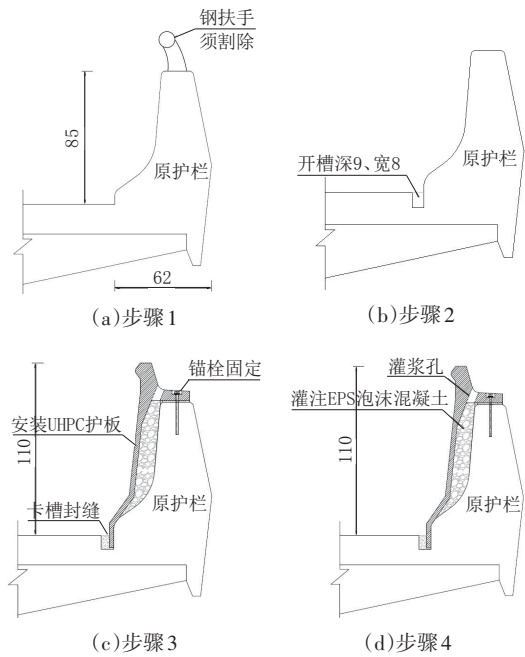


图4 改造步骤(单位:cm)

深 9 cm,宽 8 cm。

步骤 3:按照既定位置安装 UHPC 预制薄壁护板,顶部采用螺栓固定,底部卡槽口灌浆封闭。

步骤 4:在预制护板与原护栏之间的空腔内灌注 EPS 泡沫混凝土,封孔后即可开放正常交通。

UHPC 预制薄壁护板标准节段有 2.5 m 和 4 m 两种,可根据需要定制;护板标准厚度为 3 cm,顶部局部加厚;竖向加劲肋间距 2 m,厚度 2~4 cm;护板内铺设钢筋网,顶部采用钢筋骨架加强。图 5 所示为 UHPC 薄壁护板构造三维图。

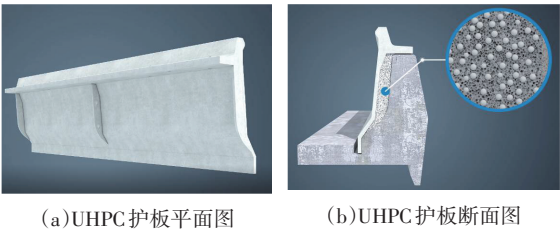


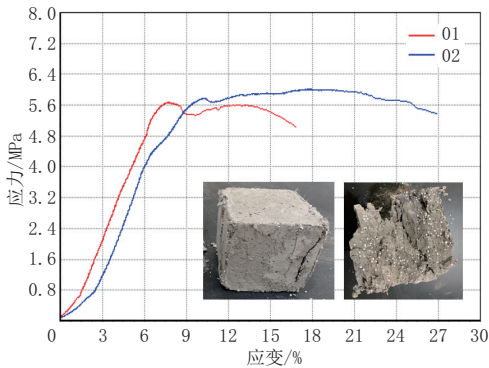
图5 UHPC薄壁护板构造三维图

EPS 泡沫混凝土由再生 EPS 颗粒与水泥基材料胶凝而成,其强度与 EPS 颗粒含量密切相关,经试验测试,20%EPS 抗压强度为 5.6 MPa 左右,50%EPS 抗压强度为 2.5 MPa 左右(见图 6)。

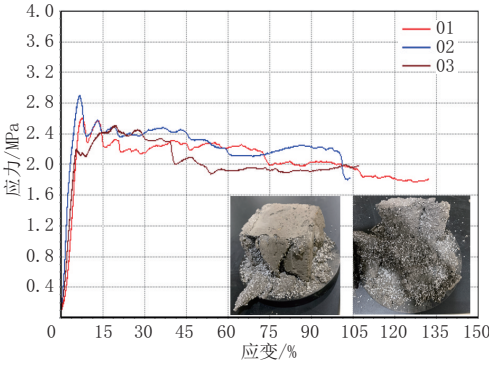
复合结构主要材料性能指标见表 2、表 3。

该设计方案主要有以下优点。

(1)工厂化生产,品质有保障。UHPC 护板在工厂采用定型钢模板分节段加工制作,通过高温蒸养等措施,加强产品质量控制,提升工程品质。



(a)20%EPS 含量应力-应变曲线



(b)50%EPS 含量应力-应变曲线

图6 EPS 泡沫混凝土试验情况

表 2 UHPC 超高性能混凝土技术性能指标表(28 d 标准养护)

抗压强度/ 度/MPa	抗折强度/ 度/MPa	弹性段 抗拉强度/ MPa	极限抗拉 强度/MPa	极限拉伸 应变/%	弹性模量/ GPa
≥120	≥22	≥7	≥8	≥0.2	40~50

表 3 EPS 泡沫混凝土技术性能指标表

抗压强度/ MPa	干容重/ (kN·m ⁻³)	流动度/ mm	EPS 材料占比/ %
≥2.5	≤22	180±20	20~50

(2)装配化施工,方便快捷。预制 UHPC 薄壁护板标准节段长 2~4 m(单块重量 380~760 kg),构件小、重量轻,现场采用小型吊装设备逐块安装即可,占地小、施工快、效率高、干扰小、风险低。

(3)节能利废,低碳环保。无须拆除既有护栏,几乎无废弃工程,同时可利用再生 EPS 泡沫颗粒,减少环境污染。

(4)复合设计,刚柔并济。充分利用 UHPC 高强韧特性及夹芯填充材料的吸能特性,在提升安全防护能力的同时也保护了既有护栏结构。

(5)模块式构件,更换方便。UHPC 薄壁预制件(护板)按标准模块化设计,一旦发生护板损伤事故,仅须将受损的护板节段进行拆卸更换,从而达到快速修复的目的。

2.4 碰撞试验

目前,该技术经过国家检验检测认证公共服务平台(CMA和CNAS)的检测,成功获得认证。在六(SS)级碰撞条件下,经小型客车、大型客车和大型货车实车足尺碰撞试验(见图7至图9),该护栏标准段的阻挡功能、缓冲功能、导向功能指标均符合《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)的要求(见表4、表5)。



图7 碰撞试验现场照片

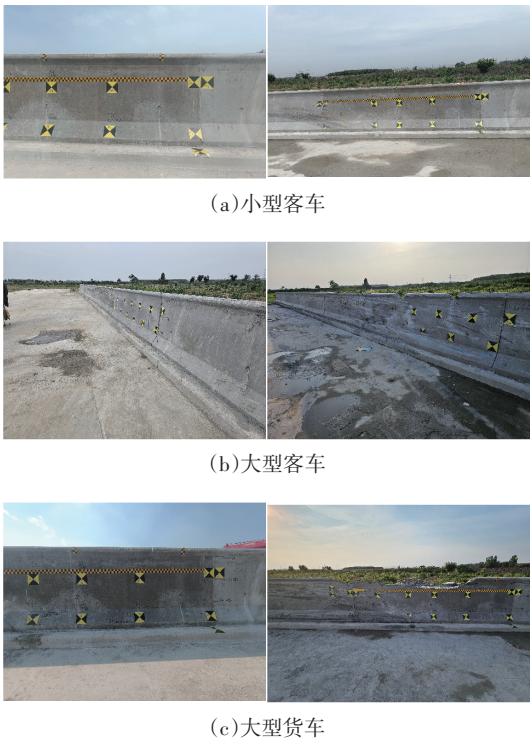


图8 护栏碰撞前后对比照片

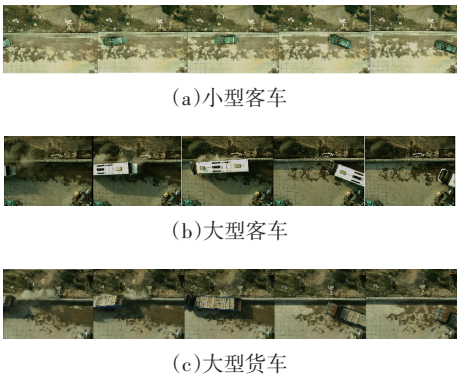


图9 碰撞试验车辆运行轨迹照片

表4 碰撞试验检测条件一览表				
碰撞车型	车辆总质量/kg	碰撞速度/(km·h ⁻¹)	碰撞角度/(°)	碰撞能量/kJ
小型客车	1 500	101	20	69
大型客车	18 000	80	20	520
大型货车	33 020	61	20	536

表5 碰撞过程中护栏及车辆动态位移表				
碰撞车型	护栏最大横向动态变形值/cm	护栏最大横向动态位移外延值/cm	车辆最大动态外倾值/cm	车辆最大动态外倾当量值/cm
小型客车	0.3	62.3	—	—
大型客车	1.4	63.4	34.9	44.8
大型货车	2.0	65.0	112.7	146.5

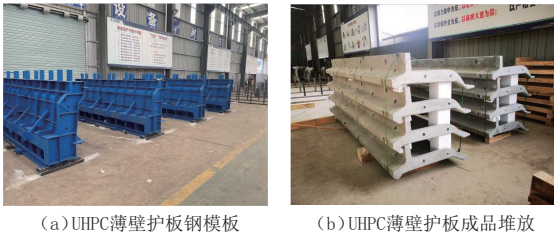
试验结果如下。

- (1)从车辆碰撞后车辆倾覆情况可见:小型客车、大型客车及大型货车与护栏碰撞后均未发生倾覆及越出护栏情况,从而可得UHPC复合式护栏能有效阻挡失控车辆越出桥外。
- (2)从车辆碰撞后车辆运行轨迹可见:小型客车、大型客车及大型货车与护栏碰撞后均可驶回车道,从而可得UHPC复合式护栏具有良好的导向功能。
- (3)从护栏碰撞前后损坏情况可见:小型客车与护栏碰撞后,护栏表面仅有轻微刮擦,未发现明显破损;大型客车与护栏碰撞后,护栏表面仅有局部掉角,未发现明显破损;大型货车与护栏碰撞后,护栏顶部有局部损伤,护栏主体基本完好。由此可得UHPC复合式护栏具有良好的强度。
- (4)从护栏动态变形值及延值可见:大型货车碰撞时,护栏最大横向动态变形值为2 cm,最大横向动态位移外延值为65 cm,因此可得UHPC复合式护栏具有良好的韧性。

3 护栏预制及现场安装

3.1 护栏预制

首先,在工厂分节段预制UHPC薄壁护板,标准节段长一般为2~4 m;其次,UHPC浇筑完成后采用高温蒸汽养护;最后成品验收合格后运输至现场。图10所示为护板预制现场照片。



(a) UHPC薄壁护板钢模板 (b) UHPC薄壁护板成品堆放

图10 护板预制现场照片

3.2 现场安装

护栏安装前需要对原护栏表面进行凿毛处理,同时在护栏底部进行开槽处理,如图11所示。

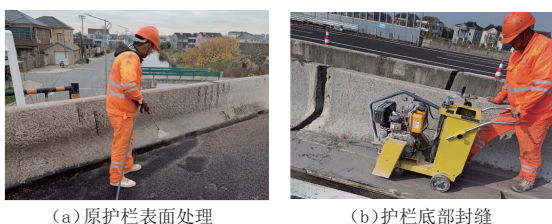


图11 护栏安装前准备工作

上述工作完成后,将UHPC护板运送至现场,采用随车吊进行吊装,安装就位后采用螺栓将预制护板固定连接在原护栏上,同时底部卡槽内灌浆封闭,如图12所示。



图12 UHPC现场安装

预制护板节段之间采用封缝胶封缝,然后利用预制护板顶部的灌浆孔,在预制护板与原护栏之间的空腔内灌注EPS泡沫混凝土,封孔后即可开放正常交通,如图13所示。



图13 灌注EPS泡沫混凝土后开放交通

在上述高速公路护栏提升改造项目中,装配式UHPC薄壁复合结构的成功应用,充分展示了该技术施工速度快、交通干扰小、低碳环保、经济合理、后期可更换等优势。经测算,该技术与拆除重建方案相比,每百公里护栏提升改造工程可减少废弃料约10万t,缩短封道时间约2/3,降低人工成本约60%,节省总投资至少1亿元,具有良好的经济、社会效益及推广应用价值。

4 结 语

随着高速公路交通量的逐年增加以及荷载的增

大,桥梁护栏防撞性能要求越来越高,因此,如何在最大限度保护利用现状护栏的基础上,对既有护栏进行科学合理的提升改造,从而达到安全耐久、方便快捷、经济合理、低碳环保的目的,是目前急须解决的问题。围绕上述问题,本文的主要研究工作总结如下。

(1)提出了一种基于功能梯度原理的UHPC/EPS复合防撞结构新体系。该体系以高强韧、高耐久的UHPC薄壁带肋预制件为阻裂防溃层,以轻质吸能的EPS泡沫混凝土为能耗层,通过局部增韧整体耗能的结构优化设计,提升既有混凝土护栏的安全防护能力,从而避免了车辆直接撞击原护栏,减小了车辆撞击对原结构产生的内力,最大限度保护并利用了原结构。

(2)设计了一种适合工业化生产和安装的超高性能混凝土(UHPC)预制构件。该预制件为薄壁带肋结构,标准模块化设计,在工厂加工制作而成,实现了规模化工业生产。该结构重量轻、安装方便、施工速度快,可最大限度减少对交通的干扰。该UHPC复合式护栏结构已通过实车足尺碰撞试验认证,同时在实际工程中得以应用。

(3)研发了一种灌注式EPS泡沫混凝土耗能材料。该材料由再生EPS颗粒与水泥基材料胶凝而成,具有流动性好、质量轻、吸能可控等优势,适用于狭小空间内的灌注,同时节能利废,实现了经济绿色循环发展。

参考文献:

- [1] 雷正保.大力开展半刚性护栏防撞新机理的研究[J].振动与冲击,2002(1):3-8.
- [2] 欧阳邦,李刚,祖元弟.欧洲常用防撞护栏功能分类及其优缺点分析[J].中外公路,2009,29(4):279-281.
- [3] 崔洪军,崔珊,邢小高,等.护栏高度变化对防撞能力影响研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(1):84-90.
- [4] 张孝臣.预制超高性能混凝土修复既有混凝土结构界面粘结性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- [5] JTG/T D81—2017,公路交通安全设施设计细则[S].
- [6] 交通运输部公路科学研究院.提升公路桥梁安全防护能力专项行动技术指南[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.
- [7] 崔冰,王景全,刘加平.UHPC桥梁研究进展与规模化应用技术路径分析[J].中国公路学报,2023,36(9):1-19.
- [8] 蒋键铭,王银辉,李志勇,等.超高性能混凝土节段拼装混凝土护栏受力性能分析[J].科学技术与工程,2021,21(15):6463-6471.