

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2024.10.065

# 螺栓连接预制桥梁防撞护栏静力性能试验研究

蒲 键<sup>1</sup>,袁 迎<sup>1</sup>,陈 翔<sup>1</sup>,朱俊豪<sup>1</sup>,赵俊亮<sup>2</sup>

(1.浙江瓯越交建科技股份有限公司,浙江 温州 325000; 2.温州大学 建筑工程学院,浙江 温州 325035)

**摘 要:**针对长度为 4 m 的螺栓连接预制装配式桥梁护栏静力性能进行足尺寸试验研究,验证了其施工可行性,并获取了其荷载-变形全曲线和破坏模式。根据试验结果,单段护栏承载力无法满足现行规范横向碰撞荷载的要求;由于护栏节段过短,与其相连的桥面悬臂板受力更为集中,导致桥面板发生屈服和局部扭转破坏,护栏本身则未发生破坏,与规范采用的破坏模式不符。此外,采用有限元软件对护栏受力性能进行了模拟和参数分析,结果表明:护栏承载力随着节段长度增大而增大,当护栏长度达到 12 m 以上时,方能使护栏发生塑性破坏而且桥面板不破坏。

**关键词:**装配式护栏;静力性能;现场试验;有限元模拟

**中图分类号:** TU997

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1009-7716(2024)10-0292-05

## 0 引 言

桥梁护栏设置于桥梁两侧及中央,主要功能是分隔、阻挡、缓冲和导向等。当车辆与护栏发生碰撞时,能够通过护栏变形、车辆爬升吸收碰撞能量,降低碰撞车辆和车内乘员受冲击的程度,阻挡碰撞车辆穿越、翻越和骑跨护栏,使碰撞车辆向行车方向顺利导出并恢复运行状态<sup>[1]</sup>。根据设计防护能量的不同,《公路护栏安全性能评价标准》(JTG B05-01—2013)将护栏由低到高分为一至八级共 8 个防护等级,其中高速公路护栏的防护等级通常为四级(SB)、五级(SA)、六级(SS)3 个等级<sup>[2]</sup>。混凝土护栏是一种常用的刚性护栏,具有良好的强度、刚度和经济性,且形式灵活,在实际工程中使用最为广泛。

我国混凝土护栏设计按承载能力极限状态设计方法进行<sup>[3]</sup>。以标准段碰撞为例,需要考虑 3 个方向的等效静力碰撞荷载:(1)作用方向与护栏面垂直的横向碰撞荷载  $F_1$ ,分布长度为  $L_1$ ;(2)作用方向与护栏面平行的纵向碰撞荷载  $F_2$ ,且  $F_2=F_1/3$ ,分布长度  $L_2=L_1$ ;(3)作用方向为垂直向下的竖向碰撞荷载  $F_3$ , $F_3$ 的大小等于车辆重量,分布长度  $L_3$ 为车辆长度。对于五级(SA)钢筋混凝土刚性护栏,横向碰撞荷载  $F_1$ 取 410 kN, $L_1=L_2=2.4$  m,碰撞荷载作用在距离桥

面约 0.84 m 的位置。国内外规范多采用屈服线分析理论来计算护栏的水平抗力,护栏的抗力需大于横向碰撞荷载。在该设计方法中,通常假设破坏发生在护栏内,而不延伸到桥面板,这就要求护栏必须具有足够长度,从而能将碰撞荷载分配到足够长的桥面板上。当护栏较短时,与其共同受力的桥面板也更短,需要桥面板具有更大的厚度和承载力;即使桥面板承载力足够,短护栏也可能在护栏底部形成 1 条与桥面板平行的屈服线。

钢筋混凝土护栏屈服线分析方法见图 1。

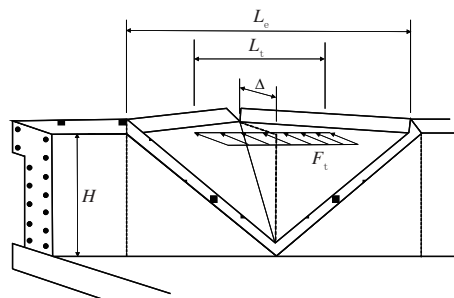


图 1 钢筋混凝土护栏屈服线分析方法<sup>[3]</sup>

对现浇护栏,通常在桥面板悬臂端预留护栏锚固钢筋,在上部结构安装就位后,再绑扎护栏钢筋并通过焊接或搭接与锚固钢筋连接,然后进行护栏浇筑。护栏浇筑时,通常在桥墩、桥台附近设置施工缝。因此,现浇护栏的长度通常与跨径接近,能够满足屈服破坏发生的条件。

近年来,随着装配式桥梁施工技术的发展,装配式护栏也逐步提上日程。国内外学者研制了多种装配

收稿日期: 2023-09-07

基金项目: 温州市科技局基础性工业科技项目(G20210026)

作者简介: 蒲键(1987—),男,学士,工程师,从事桥梁预制构件研发与生产工作。

式护栏<sup>[4-6]</sup>,对其受力性能进行了试验研究<sup>[6-8]</sup>、数值模拟<sup>[9-11]</sup>和理论分析。装配式护栏的核心问题是如何实现护栏与桥梁上部结构之间的连接,以及相邻护栏直接连接。然而,到目前为止,尚没有一种比较成熟和被广泛认可的预制护栏施工方式,且多数研究仅关注护栏与桥面板之间的连接而忽略了护栏节段之间的连接。

本文对某高速公路初步设计提出的螺栓连接装配式护栏进行了足尺寸现场试验,以验证施工工艺的可行性,并获得护栏水平荷载-变形曲线和破坏模式。在试验研究基础上,采用有限元软件对护栏进行受力分析,并与试验结果进行对比验证,然后通过参数分析,提出该装配式护栏设计优化建议。

### 1 现场试验

#### 1.1 试验方案

某高速公路初步设计阶段,提出采用图2所示预制装配式护栏。护栏防护等级为五级(SA),单个节段长度4 m,护栏内侧设置4组(8根)8.8级的M30六角螺栓与桥面板通过预留孔洞进行连接;桥面板预留孔道设置灌浆口,连接完成后进行灌浆处理;护栏之间不进行相互连接,设置1 cm间隙,采用橡胶软木塞填、环氧砂浆勾缝。

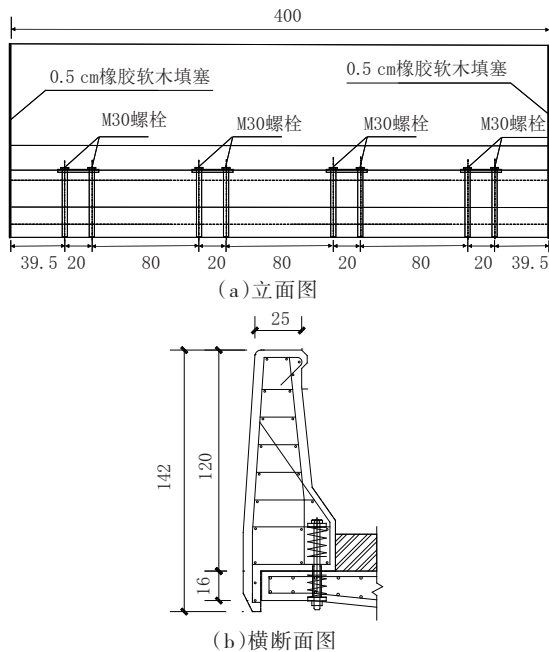


图2 预制装配式护栏构造(单位:cm)

为了验证该设计的施工可行性和护栏受力性能,在预制厂制作了一个足尺寸护栏节段和一个长度为6 m的T梁节段。为了增加稳定性,T梁节段腹板采用宽90 cm、高50 cm的矩形截面代替,并在护

栏对面设置厚60 cm、高1.2 m、长4 m的反力墙。护栏静力性能试验设计图见图3。T梁节段悬臂板长度90 cm,悬臂端厚16 cm,根部厚22.5 cm,配筋参考现行通用图集T梁悬臂板。T梁节段和反力墙采用C50混凝土浇筑,浇筑好的节段如图4所示。预制护栏节段截面尺寸及配筋均与现浇护栏一致,采用C30混凝土浇筑,浇筑前在护栏相应位置预埋8根M30连接螺杆。预制T梁和护栏强度达到设计强度后,进行护栏的安装作业,如图5所示。安装前,首先清洁桥面板与护栏之间的接触面并均匀涂抹环氧树脂,然后采用龙门吊将护栏节段吊起,在工人辅助下,预埋螺栓顺利进入悬臂板预留孔洞。之后,在悬臂板底侧安装螺母并拧紧,完成预制护栏的安装。由于预制T梁和预制护栏制作精度控制较好,安装过程整体顺利。为了验证螺栓的可靠性,试验中没有对桥面板预留孔洞进行灌浆处理。

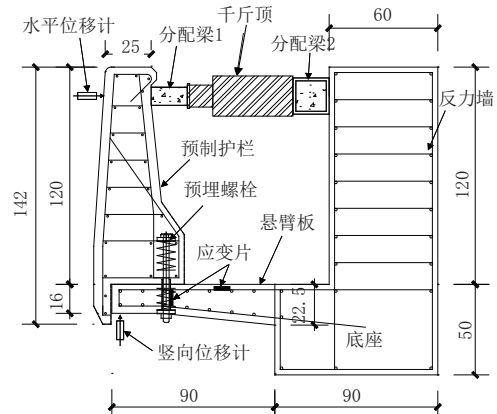


图3 护栏静力性能试验设计(单位:cm)

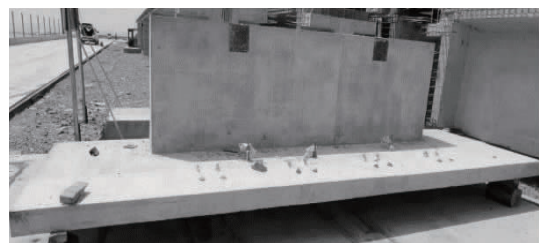


图4 预制T梁节段



图5 预制护栏安装

预制护栏安装就位后,在护栏和反力墙之间安装千斤顶,如图6所示。护栏侧分配梁纵向长度为2.4 m,与《公路护栏安全性能评价标准》规定的水平碰撞荷载分布长度相同。千斤顶中心与桥面板的竖向距离为1.04 m,为上述规范规定的横向碰撞荷载高度(0.84 m)与桥面铺装厚度(0.2 m)之和。试验中,在护栏外侧加载点高度处,采用电子位移计测量护栏中间和两端的水平变形,在悬臂板底部测量悬臂端的竖向变形;此外,还测量了悬臂板顶部横向钢筋应变以及预埋连接螺杆的应变。测量系统就位后,控制千斤顶缓慢顶出,实现预制护栏的水平加载。



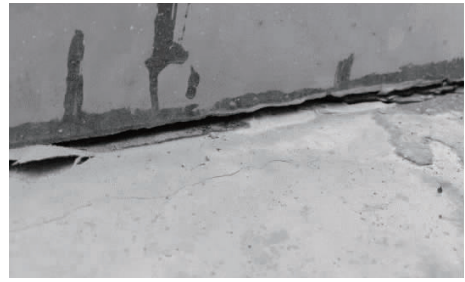
图6 预制护栏加载

## 1.2 试验结果与分析

加载初期,荷载增长较快,护栏无明显变形;随着荷载增大,护栏底部与桥面板之间的接缝逐渐张开(见图7(a)),护栏发生明显水平变形,桥面板则出现竖向变形;荷载继续增大后,悬臂板顶部出现纵向弯曲裂缝,护栏两端的悬臂板出现斜向扭转裂缝并逐渐扩大(见图7(b));最终荷载维持在360 kN附近保持不变,当护栏水平变形达到70 mm左右时,护栏承载力仍未明显下降,试验停止。

图8为护栏外侧3个水平位移计测得的护栏水平变形、悬臂板端部测得的竖向变形随着荷载变化的曲线。由图8(a)可见,护栏节段中间与两端的水平变形基本一致,即护栏基本不存在自身纵向弯曲,护栏的荷载-水平变形曲线整体与适筋梁的荷载曲线形状相似,展示出良好的塑性变形能力。排除试验数据波动后,护栏节段最大承载力约为360 kN,为规范规定的横向碰撞荷载(410 kN)的87.8%,即单个护栏节段承载力无法满足规范要求。由图8(b)可见,悬臂板端部的竖向变形随着荷载变化的整体曲线形状与护栏水平变形相似,但数值更小。

图9展示了螺杆应变、悬臂板顶部受拉钢筋应

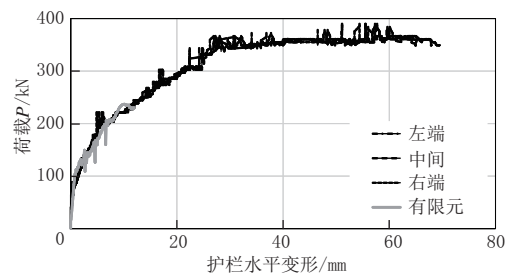


(a) 护栏底部接缝张开

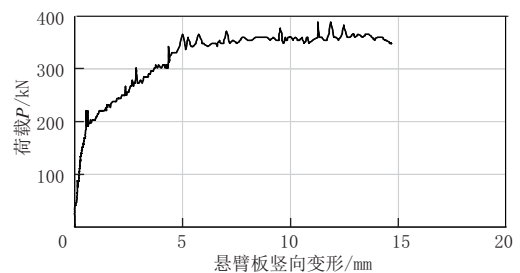


(b) 护栏端部桥面板扭转裂缝

图7 破坏模式



(a) 护栏水平变形



(b) 悬臂板竖向变形

图8 荷载-变形曲线

变随着荷载变化的曲线。由图9(a)可见,在荷载达到360 kN之前,螺杆应变整体随着荷载增大而持续增大;当荷载达到360 kN之后,螺杆应变增长缓慢或基本不变;试验停止时,螺杆最大应变为3 100  $\mu\text{m}/\text{m}$ 左右,若螺杆弹性模量取200 GPa,则螺杆弹性应力约为620 MPa,尚未达到屈服强度。由图9(b)可见,当荷载达到360 kN时,悬臂板顶部受拉钢筋应变已超过3 000  $\mu\text{m}/\text{m}$ ,超过了HRB400钢筋的屈服应变,从而导致荷载无法继续增大。护栏纵向和竖向钢筋应变普遍较小,在100  $\mu\text{m}/\text{m}$ 以下,也说明护栏变形接近整体转动。

通过上述分析可知,由于护栏节段长度仅为4 m,远小于现浇护栏的连续长度,跟随护栏共同受力的



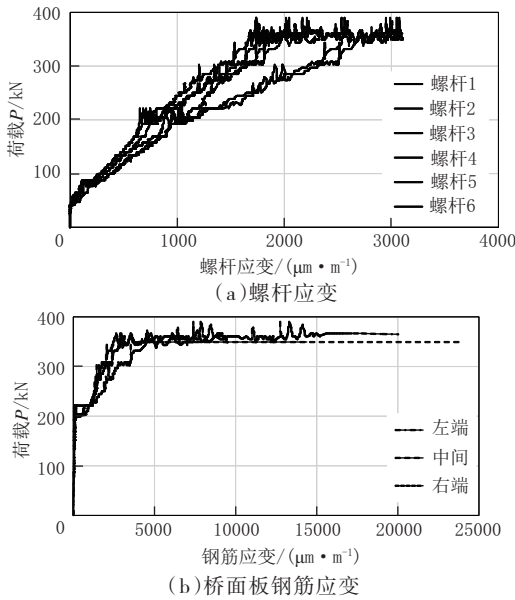


图 9 荷载 - 应变曲线

悬臂板长度也受到限制,导致悬臂板受拉钢筋的屈服先于护栏连接螺杆的屈服,最终破坏发生在悬臂板中。这与规范中护栏发生塑性破坏的假设不符,同时,桥面板破坏也不利于事故后桥梁的修复工作。

## 2 有限元模拟

为了进一步研究装配式护栏的力学性能,采用有限元软件 ABAQUS 对试验护栏进行模拟。为了减小模型规模和计算量,混凝土底座和反力墙未直接考虑,而是将悬臂板根部采用固定边界条件近似模拟底座的作用。采用实体单元(C3D8R)模拟混凝土护栏、悬臂板、螺杆,钢筋采用桁架单元(T3D2)进行模拟,并将其与混凝土固定,螺杆与混凝土之间采用“硬接触”进行模拟。混凝土的本构关系采用损伤塑性模型(Concrete Damaged Plasticity, CDP)进行模拟,钢筋和螺杆则采用理想弹塑性本构关系进行模拟。模型加载采用位移控制进行加载;采用显式动力分析方法进行计算。钢筋、混凝土的强度采用现场试验实测值。

装配式护栏有限元模型见图 10。

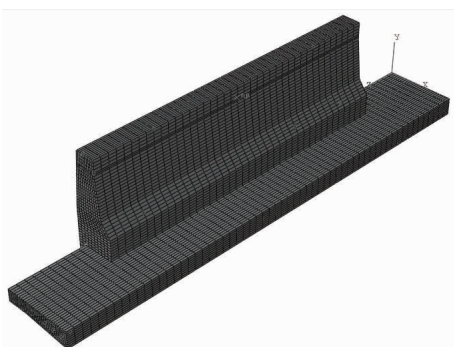


图 10 装配式护栏有限元模型

由有限元分析得到的荷载 - 护栏水平变形如图 8(a)所示。由此可见,有限元模型模拟结果整体与试验结果吻合,但当护栏水平变形超过 12 mm 后,有限元模型由于材料局部塑性变形过大,无法继续计算。计算停止时,装配式护栏有限元破坏模式如图 11 所示。显然,此时护栏两端悬臂板产生了明显的局部扭转破坏,与图 7(b)的破坏模式相符。与试验结果的对比表明,本有限元模型能够较好地模拟护栏的受力过程和破坏模式。



图 11 装配式护栏有限元破坏模式

采用上述有限元模型,进一步计算长度为 6 m 和 8 m 的护栏节段荷载 - 变形曲线,并与长度为 4 m 的护栏节段进行对比,结果如图 12 所示。其中,根据工程实际,护栏混凝土强度取 C30,悬臂板强度取 C50,钢筋均采用 HRB400 钢筋。因此,长度为 4 m 护栏的荷载 - 变形曲线与图 8(a)存在略微差别。由图 12 可见,随着护栏长度增大,护栏承载力基本呈线性增大,即增大护栏节段长度可有效提高其承载力。然而,8 m 护栏的破坏仍然发生在悬臂板中。进一步分析表明,当护栏长度达到 12 m 以上时,破坏才发生在护栏中,如图 13 所示。

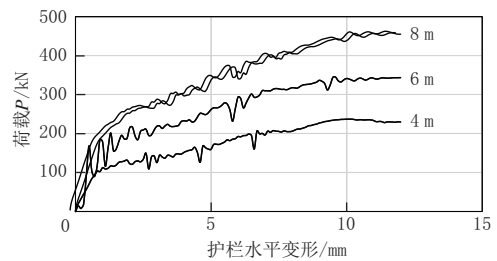


图 12 不同长度护栏荷载 - 变形曲线

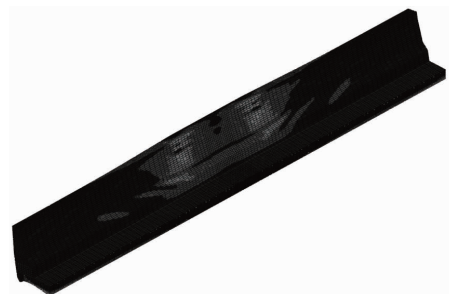


图 13 长度 12 m 护栏的破坏模式

## 3 结语

(1)螺栓连接装配式护栏施工工艺可行,安装效

率较高,但施工中需控制好预埋螺杆和桥面板预留孔洞施工精度。

(2)长度4 m护栏的水平承载力实测值仅为360 kN左右,无法满足规范对五级护栏横向碰撞承载力的要求。

(3)长度4 m护栏的长度较短,试验中,护栏变形接近整体转动,与护栏相连的桥面板发生屈服和局部扭转破坏,护栏自身则未发生破坏,与规范采用的破坏模式不符。

(4)所建立的有限元模型能较好地模拟护栏的荷载-变形曲线;基于有限元参数分析,护栏承载力随节段长度增大基本呈线性变化。

(5)当护栏节段长度达到12 m以上时,方能在护栏中实现塑性破坏;建议装配式护栏节段之间应设置纵向连接,使其连续长度达到12 m以上。

#### 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] 李景丰,孔庆宇,王新荣.高速公路装配式桥梁混凝土护栏嵌固式基

- 础结构研究[J].桥梁工程,2020(9):279-281,288.  
 [5] 宋琢,刘昕炜.预制装配式桥梁防撞栏施工技术研究[J].广州建筑,2020,48(1):40-43.  
 [6] CHARRON J P, NIAMBA E, MASSICOTTE B. Static and dynamic behavior of high- and ultrahigh-performance fiber-reinforced concrete precast bridge parapets[J].Journal of Bridge Engineering (ASCE), 2011, 16(3): 413-421.  
 [7] JEON S J, CHOI M S, KIM Y J. Failure mode and ultimate strength of precast concrete barrier[J].ACI Structural Journal, 2011, 108(1): 99-107.  
 [8] NAMY M, CHARRON J P, MASSICOTTE B. Structural behavior of cast-in-place and precast concrete barriers subjected to transverse static loading and anchored to bridge deck overhangs [J].Canadian Journal of Civil Engineering, 2015, 42(2): 120-129.  
 [9] NAMY M, CHARRON J P, MASSICOTTE B. Structural behavior of bridge decks with cast-in-place and precast concrete barriers: Numerical modeling[J].Journal of Bridge Engineering (ASCE), 2015, 20(12): 04015014.  
 [10] LI Z, GAO X, TANG Z. Safety performance of a precast concrete barrier: Numerical study[J].Computer Modeling in Engineering & Sciences, 2020, 123(3): 1105-1129.  
 [11] 於弈铮,王银辉,罗征.冲击荷载下预制装配式护栏的防撞性能分析[J].公路与汽运,2020(196):40-45.

## 《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:[cdq@smedi.com](mailto:cdq@smedi.com)