

# 装配式防撞护栏竖向连接设计 与准静态加载分析

付 军<sup>1,2</sup>, 黄豪杰<sup>1</sup>, 闵亦斌<sup>1</sup>, 柯文汇<sup>3</sup>, 李 俊<sup>3</sup>

(1. 武汉理工大学交通与船海学部, 湖北 武汉 430063; 2. 武汉理工大学硅酸盐建筑材料国家重点实验室, 湖北 武汉 430070; 3. 武汉市市政工程机械化施工有限公司, 湖北 武汉 430023)

**摘 要** 目的 提出三种装配式防撞护栏竖向连接设计方案, 即预埋 H 型钢焊接与浆锚连接相结合(方案一); 预埋倒 T 型钢板焊接及浆锚连接相结合(方案二); “双环锚固”嵌固连接(方案三), 解决装配式混凝土护栏抗剪和耐久性差、护栏竖向连接设计单一、装配式安装造价高昂等问题。**方法** 在考虑竖向连接构造与配筋的基础上, 建立了相应的护栏-桥面板有限元模型, 通过数值模拟开展装配式护栏准静态加载分析, 研究上述三种装配式护栏的极限承载能力与失效特点, 并简要对比其制造工艺与相对成本。**结果** 三种竖向连接方案的护栏最大承载力分别为 600 kN、340 kN 和 400 kN; 方案一呈现倒梯形屈服破坏, 方案二与方案三出现应力集中并整体倾覆; 方案一满足 SA 级桥梁护栏的设计要求, 同时兼具工艺简便与相对成本较低的优点。**结论** 预埋 H 型钢焊接和浆锚连接相结合的竖向连接方式为优选方案, 可为装配式防撞护栏的研究与应用提供参考。

**关键词** 装配式混凝土护栏; 竖向连接方式; 准静态加载; 有限元分析

中图分类号 TU 528; U443.7

文献标志码 A

## Vertical Connection Design and Quasi-Static Loading Analysis of Prefabricated Anti-collision Barrier

FU Jun<sup>1,2</sup>, HUANG Haojie<sup>1</sup>, MIN Yibin<sup>1</sup>, KE Wenhui<sup>3</sup>, LI Jun<sup>3</sup>

(1. School of Transportation & Shipping, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 430063; 2. State Key Laboratory of Silicate Materials for Architectures, Wuhan University of Technology, Wuhan, China, 430070; 3. Wuhan Municipal Engineering Mechanization Construction Co. Ltd., Wuhan, China, 430023)

**Abstract:** Three design schemes for vertical connection of assembled concrete guardrail are put forward, which are the combination of pre-buried H section steel welding and grouting anchor connection (the scheme 1), pre-buried inverted T section steel welding and grouting anchor

收稿日期: 2023-07-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(U21A20149)

作者简介: 付军(1972—), 男, 教授, 博士研究生导师, 主要从事工程结构与材料服役性能等方面研究。

connection(the scheme 2),and “double loop rebar anchoring” embedded connection(the scheme 3). It will solve the problems of poor shear resistance and durability, single design of vertical connection and high cost of installation in assembled concrete guardrail. By considering the construction and reinforcement of the vertical connection, the corresponding finite element models of barrier-bridge deck plate were established, and the quasi-static loading analysis of prefabricated barrier was carried out. The research analyzes the ultimate bearing capacity and failure characteristics and makes a brief comparison between manufacturing process and relative cost. The results show that the maximum bearing capacity of the three kinds of barriers are 600 kN, 340 kN and 400 kN respectively. The scheme 1 shows inverted trapezoid yield failure, and the scheme 2 and 3 show stress concentration and overall overturning. The scheme 1, which is about the combination of pre-buried H section steel welding and grouting anchor connection, meets the design requirements of SA grade bridge guardrail, and has the advantages of simple process and lower relative cost. It is selected as the optimum scheme, which can provide reference for the research and application of assembled guardrail.

**Key words:** prefabricated concrete barrier; vertical connection design; quasi-static loading; finite element analysis

混凝土防撞护栏广泛应用于各类公路与桥梁上,是行车安全的重要保障<sup>[1]</sup>。装配式防撞护栏因其高效率、高质量、低污染、低成本等诸多优点引起了国内外学者的广泛关注。装配式技术在桥梁上、下部结构的应用已逐渐成熟,但涉及防撞护栏领域的研究与应用较少,主要是由于装配式护栏底部与桥面的竖向连接因钢筋或混凝土不连续而削弱了护栏的抗剪性能。另外,吊装设备和预制块长度的限制,导致护栏整体性较差。

桥梁结构中预制盖梁、桥墩与承台相互之间及预制桥墩节段间的拼装连接方式可作为探索装配式护栏连接方式的参考,其主要有湿连接和干连接。湿连接主要为灌浆套筒连接<sup>[2]</sup>、灌浆波纹管连接<sup>[3-4]</sup>以及承插式灌浆连接<sup>[5]</sup>;干连接主要为后张无黏结预应力连接<sup>[6]</sup>与螺栓连接<sup>[7-8]</sup>。M. Namy 等<sup>[9-10]</sup>通过非线性有限元分析比较装配式和现浇桥梁护栏在横向荷载作用下的荷载传递和破坏形式,研究了装配式护栏静载下对桥面板结构应力和耐久性的影响并进行参数优化,设计了一种用于连接装配式护栏的剪力键。F. Duchesneau 等<sup>[11]</sup>使用有限元计算验证了由纤维增强混凝土(FRC)制成的装配式桥

梁护栏的安全性能,并对其螺栓与钢筋连接方式进行了优化设计。K. Sennah 等<sup>[12]</sup>设计了一种玻璃纤维增强聚合物(GFRP)锚固头传力杆,该传力杆使护栏耐久性更好,钢筋使用量更少。J. Lee 等<sup>[13]</sup>提出了一种带有针对大中型车辆的缓冲装置的新型防撞护栏,并通过实车碰撞试验和数值模拟后,发现护栏发生剪切破坏,并且出现了大面积的损伤,还需对其进行进一步优化与加固设计。S. Basit 等<sup>[14]</sup>提出了一种钢筋混凝土护栏与桥面板的环形钢筋锚固方式,研究表明,环形钢筋锚固能力强,更好地解决了边缘处的钢筋分布集中和应力集中问题。黄逸锋等<sup>[15]</sup>通过两种优化方法以及静力、动力分析来为装配式防撞护栏找到更优异的连接形式,发现倒T型竖向连接方式经过优化之后,其材料节省了26.1%,且钢板在护栏背部的纵向连接性能良好。

基于目前混凝土护栏抗剪和耐久性差、护栏竖向连接设计单一、装配式安装造价高昂,笔者提出了三种装配式防撞护栏的竖向连接设计方案,利并用LS-DYNA有限元软件开展装配式护栏在准静态加载下的受力性能分析,以探求更可靠、更经济、更便捷的连接方式。

1 护栏竖向连接方案

武汉市南泥湾大道定位为一级公路,高架桥梁护栏防护等级为SA级。防撞护栏设计采用装配式混凝土护栏,综合《公路交通安全设施设计细则》(JTG/T D81—2017)和吊装条件与经济性等因素,装配式护栏标准段长度为4 m。护栏防护高度(护栏顶部至

桥面距离)为1 m,其构造符合SA级混凝土护栏的构造要求。

护栏和桥面板混凝土等级分别为C40和C50。钢筋选用HRB400,纵向钢筋、截面钢筋直径分别为12 mm和16 mm,具体构造见图1所示。笔者提出了三种装配式护栏竖向连接设计方案,如图2所示。

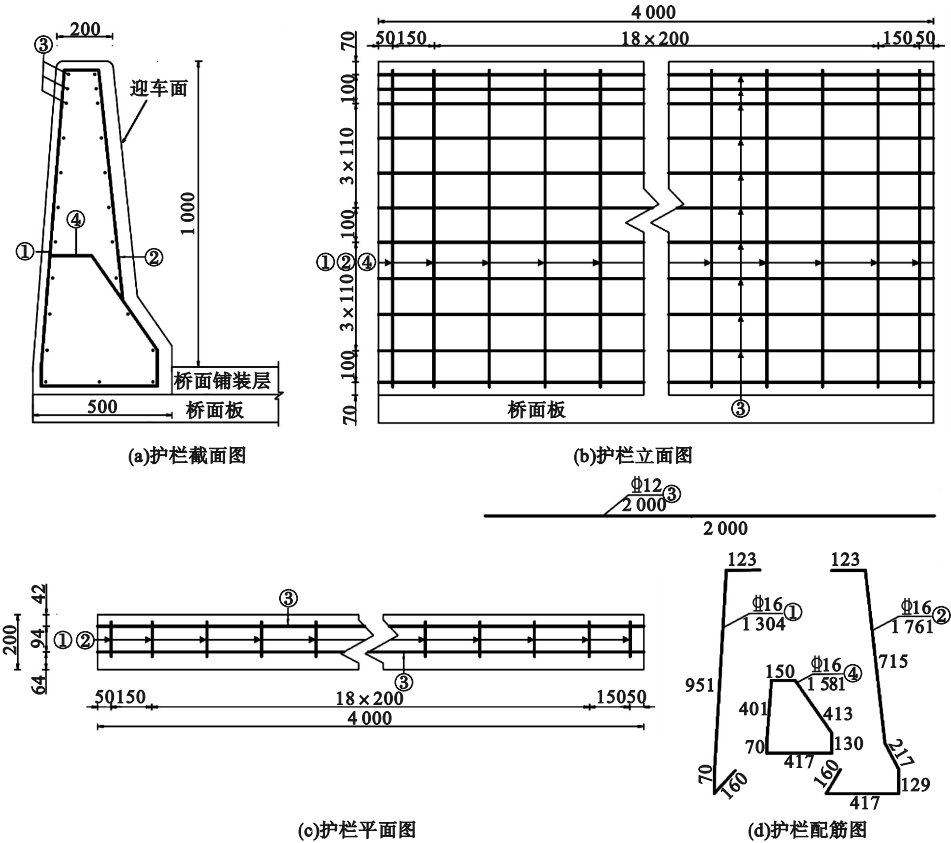


图1 护栏构造图

Fig. 1 The structural dimension of guardrail

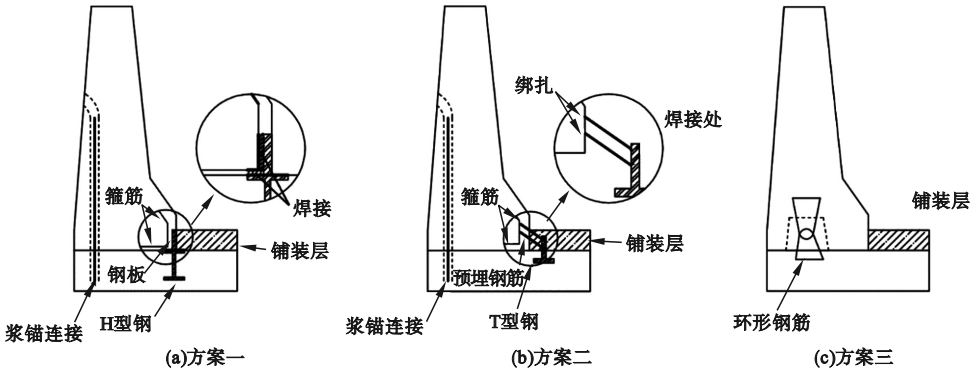


图2 竖向连接设计方案

Fig. 2 The design schemes of vertical connection

方案一:采用预埋 H 型钢焊接与浆锚连接技术。在桥面预埋 H 型钢板以及预留伸筋,在预制护栏迎车面底部预埋钢板以及护栏内部预埋金属波纹管,钢板均采用 Q345 钢材。护栏底部钢板与桥面预埋 H 型钢通过焊接连接,且焊缝强度与母材钢板强度相同。桥面预留伸筋插入预制护栏中的预埋金属波纹管并进行灌浆,金属波纹管间距为 1 000 mm,钢筋直径为 16 mm。

方案二:采用预埋倒 T 型钢板焊接及浆锚连接技术。桥面预埋倒 T 型钢板与护栏预留锚筋通过焊接连接,焊接要求与方案一相同。桥面预留伸筋插入预制护栏中的预埋金属波纹管并进行灌浆,浆锚连接与方案一相同,最后进行铺装层浇筑。

方案三:在护栏底部设置梯形嵌固槽进行嵌固连接。护栏在嵌固槽内预留环形连接钢筋,并在桥面板上与嵌固槽对应的区域预留环形钢筋,最后通过灌浆孔进行灌浆,实现护栏与桥面板“双环锚固”。环形钢筋直径 12 mm,间距 60 mm。

由于实车碰撞护栏试验耗资巨大,在做实车碰撞前常先进行护栏水平静力加载试验来评估护栏的承载力,即将车辆碰撞动力荷载转换为等效静力荷载来研究静力水平荷载与护栏位移响应和护栏损伤、钢筋应变等之间的关系<sup>[16]</sup>。

## 2 准静态加载

### 2.1 护栏-桥面板几何模型的建立

采用有限元软件 Workbench/LS-DYNA 建立分离式桥面板模型。首先在绘图软件中绘制护栏、桥面板和钢筋平面图,将关键点坐标文件导入 ANSYS Workbench 软件中 LS-DYNA 模块进行三维建模及网格划分,最后以 k 文件格式导出护栏-桥面板模型。因为 Workbench/LS-DYNA 中的材料库不够齐全,需在后处理软件 LS-Prepost 中对 k 文件

修改并赋予材料属性等关键字修改。几何模型如图 3 所示。

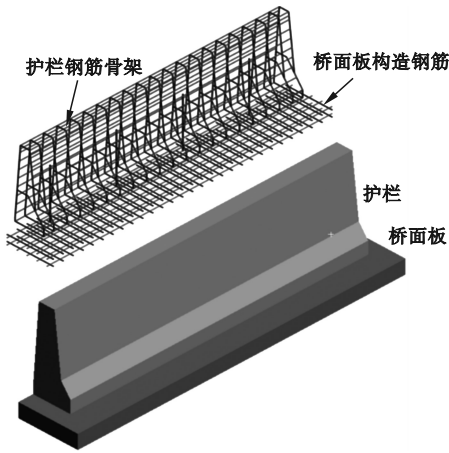


图3 护栏-桥面板几何模型

Fig.3 The geometric models of guardrail

### 2.2 钢筋本构模型

钢筋的本构模型采用 \* MAT PLASTIC KINEMATIC 塑性随动强化模型,该模型通过 Cowper-Symonds 经验模型考虑了应变率效应对钢筋材料动态力学性能的影响<sup>[17]</sup>,如式(1),具体材料参数设置见表 1。

$$\frac{f_{\text{dyn}}}{f_{\text{stat}}} = 1 + \left( \frac{\dot{\varepsilon}}{C} \right)^{1/P} \quad (1)$$

式中: $f_{\text{dyn}}$  为动态屈服强度; $f_{\text{stat}}$  为静态屈服强度; $C$  和  $P$  为材料常数。

表1 钢筋材料参数表

Table 1 The mechanical properties of rebar

密度/ ( $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$ )	泊松比	弹性模 量/GPa	屈服强 度/MPa
7 850	0.3	206	400

### 2.3 混凝土本构模型

选用 MAT159 (CSCM 模型)<sup>[18]</sup> 模拟混凝土。该本构模型考虑了材料在静力及低速冲击作用下的应变硬化和损伤,其屈服面通过多个参数相乘的方式来实现材料剪切破坏面和强化盖帽面之间的光滑连续衔接,如图 4 所示。

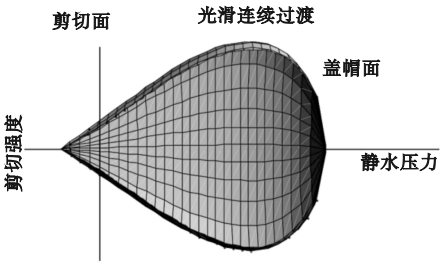


图4 CSCM模型屈服面示意图

Fig. 4 The yield surface of CSCM continuous surface cap model

屈服破坏函数形式为

$$\begin{cases} Y(J_1, J_2', J_3') = 0; \\ J_1 = 3P; \\ J_2' = \frac{1}{2}S_{ij}S_{ij}; \\ J_3' = \frac{1}{3}S_{ij}S_{jk}S_{ki}. \end{cases} \quad (2)$$

其中,偏应力张量 $S_{ij}$ 和压力 $P$ 表示不变量, $J_1$ 为应力张量的第一不变量, $J_2'$ 为偏应力张量的第二不变量, $J_3'$ 为偏应力张量的第三不变量。 $F_f$ 是剪切破坏面, $F_c$ 是盖硬化帽, $\kappa$ 是Rubin比例因子,表示帽面与剪切面相交处的压力不变量值。混凝土在受拉和低围压下的强度可用剪切破坏面来描述,该破坏剪切面的函数表达式为

$$F_f(J_1) = \alpha - \lambda \exp^{-\beta J_1} + \theta J_1. \quad (3)$$

材料参数 $\alpha, \beta, \lambda$ 和 $\theta$ 需要通过三轴压缩实验来确定。盖帽硬化面描述为

$$F_c(J_1, \kappa) = 1 - \frac{[J_1 - L(\kappa)][|J_1 - L(\kappa)| + J_1 - L(\kappa)]}{2[X(\kappa) - L(\kappa)]^2}. \quad (4)$$

$$L(\kappa) = \begin{cases} \kappa, & \kappa > \kappa_0; \\ \kappa_0, & \text{其他.} \end{cases} \quad (5)$$

$$X(\kappa) = L(\kappa) + RF_f[L(\kappa)]. \quad (6)$$

当 $J_1 > L(\kappa)$ ,方程4描述椭圆形帽盖,当 $J_1 \leq L(\kappa)$ ,盖帽硬化函数 $F_c = 1$ 。当 $J_1 = L(\kappa)$ 时,帽盖会与剪切破坏面相交,在盖帽扩张硬化之前和剪切表面相交的初始位置, $\kappa_0$ 的值为 $J_1$ 。帽盖与静水压立轴 $J_1$ 相交的

位置在 $J_1 = X(\kappa)$ 处,该交点位置具体取决于帽盖自身结构的椭圆率 $R$ 。当材料塑性体积发生收缩时,盖帽面也会伴随材料体积的压缩而膨胀( $X(\kappa)$ 和 $\kappa$ 增加);当材料的塑性体积发生膨胀时,盖帽面整体会逐渐发生收缩( $X(\kappa)$ 和 $\kappa$ 减少),且硬化法则将帽盖行为定义为

$$\varepsilon_v^p = W[1 - e^{-D_1(X-X_0) - D_2(X-X_0)^2}]. \quad (7)$$

式中: $\varepsilon_v^p$ 为指材料整体的塑性体积应变; $W$ 为材料整体出现的最大塑性体积应变; $D_1$ 和 $D_2$ 为指整体模型的输入参数; $X_0$ 为盖帽面的初始位置( $\kappa = \kappa_0$ )。帽盖面五个参数为 $X_0, W, D_1, D_2$ 和 $R$ ,通过静水压缩和一维应变测试确定。

混凝土在受拉和低至中等程度的压缩下呈现软化现象。这种行为可通过损伤公式来描述,标量损伤参数 $d$ 将未存在损伤的黏塑性应力张量 $\sigma^{vp}$ 转换为存在损伤的应力张量 $\sigma^d$ 。 $d$ 的取值在 $0 \sim 1$ , $d = 0$ 时没有损伤, $d = 1$ 时发生完全的损伤。损伤公式如下:

$$\sigma_{ij}^d = (1 - d)\sigma_{ij}^{vp}. \quad (8)$$

损伤包括延性损伤和脆性损伤。初始损伤阈值与剪切塑性面重合,因此可不必指定阈值。当外力为压力时,应变能 $\tau_c$ 超过损伤阈值 $\tau_{0c}$ 时延性损伤开始累计延性损伤累计取决于总应变分量 $\varepsilon_{ij}$ ,采用延性损伤方式进行损伤累积,关系如下:

$$\tau_c = \sqrt{\frac{1}{2}\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}}. \quad (9)$$

其中,应力分量 $\sigma_{ij}$ 是在未考虑损伤和速率效应前计算得出的弹塑性应力。当压力拉伸时,若能量类型项 $\tau_i$ 超过损伤阈值 $\tau_{0t}$ ,损伤就会发生,进而导致脆性损伤不断累积。最大主应变 $\sigma_{ij}$ 决定着脆性损伤的积累程度,可以使用脆性损伤模型进行损伤积累:

$$\tau_t = \sqrt{E\varepsilon_{\max}^2}. \quad (10)$$

随着损伤程度的加重,相关损伤公式计算下的损伤参数 $d$ 会逐渐从初始值0增加到1。脆性和延性损伤的参数关于应变的函数



如下所示。

脆性损伤:

$$d(\tau_t) = \frac{0.999}{D} \left[ \frac{1 + D}{1 + De^{-C(\tau_t - \tau_{0t})}} - 1 \right]. \quad (11)$$

延性损伤:

$$d(\tau_c) = \frac{d_{\max}}{B} \left[ \frac{1 + B}{1 + Be^{-A(\tau_c - \tau_{0c})}} - 1 \right]. \quad (12)$$

式中:参数 A、B、C、D 决定了应力 - 位移或应力 - 应变的软化曲线的形状。同时参数  $d_{\max}$  是可以达到的最大伤害等级<sup>[18]</sup>。笔者采用简单参数输入方式,具体参数如表 2 所示。

表 2 混凝土材料参数

Table 2 The mechanical properties of concrete				
密度/ (kg·m <sup>-3</sup> )	泊松比	最大骨料 直径/mm	等级强度	抗压强 度/MPa
2 400	0.18	19	C40/C50	40

2.4 单元划分、接触及边界条件

护栏和桥面板中的横向钢筋、纵向钢筋和预留钢筋等均采用 Beam161 梁单元来模拟。护栏和桥面板混凝土等级分别为 C40 与 C50,且均采用 Solid164 实体单元进行划分。采用 \*CONSTRAINED LAGRANGE IN SOLID 关键字将钢筋梁与混凝土实体单元进行节点耦合来模拟钢筋混凝土结构。以方案一为例(见图 5),预留钢板和 H 型钢均与护栏和桥面板采用“绑定”接触。护栏与桥面板采用“摩擦”接触。护栏预留钢板与 H 型钢焊接连接,本模型通过限制焊点处三个方向的位移来模拟焊缝<sup>[15]</sup>。

方案一准静态加载边界条件见图 6。荷载作用于护栏迎车面顶部。荷载线性增大,直到混凝土损伤或钢筋屈服完成加载。依据《公路交通安全设施设计原则》(JTG/T D81—2017),在设计防撞护栏时其承受的汽车横向碰撞荷载分布长度为 2 400 mm,故考虑作用分布长度为 2 400 mm。桥面板底部为固定约束。经试算,护栏模型单元尺寸大小采用 20 ~ 40 mm 时能保证计算精度。

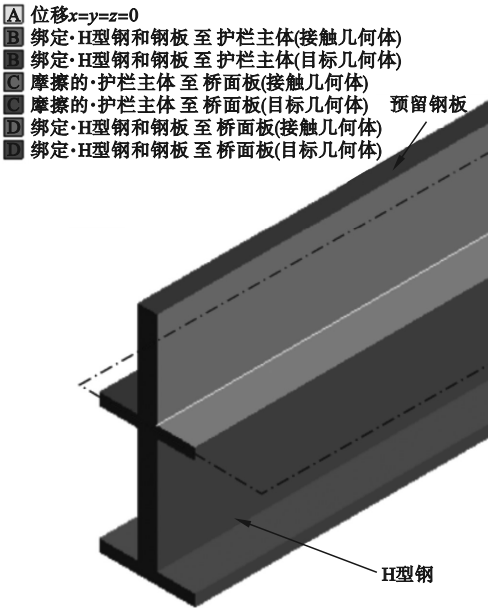


图 5 方案一预留钢板与 H 型钢接触示意图  
Fig. 5 The schematic contact diagram of reserved steel plate and H section steel in scheme 1

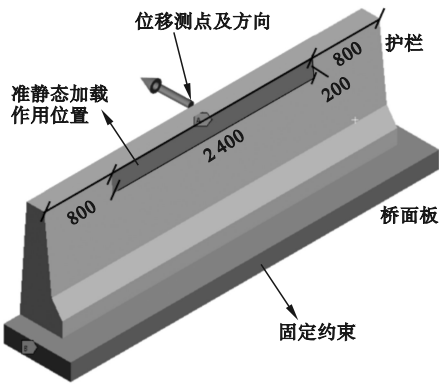


图 6 方案一边界条件  
Fig. 6 The boundary condition of scheme 1

3 数值计算结果分析

3.1 准静态加载模型验证

利用 LS-DYNA 进行准静态求解时,系统的动能与内能的比值需要控制在 10% 以下,模型要求时较高时须低于 5%。三种方案动能与内能比值曲线接近。方案一曲线见图 7,加载初期动能与内能的比值达到峰值然后迅速衰减,随着荷载的不断施加,系统内能急剧增加,而动能增长较为缓慢,后续系统动能与内能的比值一直低于 5%,因此,可认

为分析过程为准静态求解。

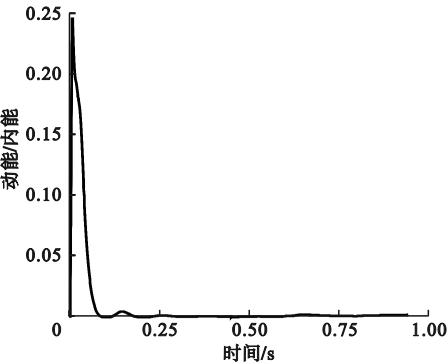


图7 动能与内能比值曲线

Fig. 7 The ratio curve of kinetic energy to internal energy

3.2 护栏破坏分析

方案一加载初期,护栏结构处于弹性阶段。加载至 370 kN 时,混凝土发生开裂,裂缝随后向护栏两端延伸,形成了一条几乎贯穿护栏的裂缝。当荷载达到 480 kN 时,出现第二条裂缝,并开始倾斜的向护栏顶部发展。加载到 550 kN 时(见图 8),先前两条裂缝之间出现第三裂缝,护栏整体呈现倒梯形屈服破坏,由于护栏结构与荷载对称分布,图幅均截取护栏的一半。当荷载加载至 600 kN(见图 9),护栏中心处受力集中,应力由中部向两端递减。护栏钢板与 H 型钢 Mises 应力峰值为 61.46 MPa,这表示钢板与 H 型钢一直处于弹性阶段,完全可以抵抗外部荷载。桥面板预留伸筋在靠近水平静力荷载作用处应力最大为 316.40 MPa,同样可以继续承受外部荷载。护栏钢筋骨架应力达到峰值

424.62 MPa,且应力峰值位于混凝土开裂附近的钢筋处,此时钢筋已进入屈服阶段。如果继续加载,护栏结构系统动能将急剧增加,动能增加幅度较大,这不符合准静态加载前提条件,故认为此护栏结构的最大承载力约为 600 kN。

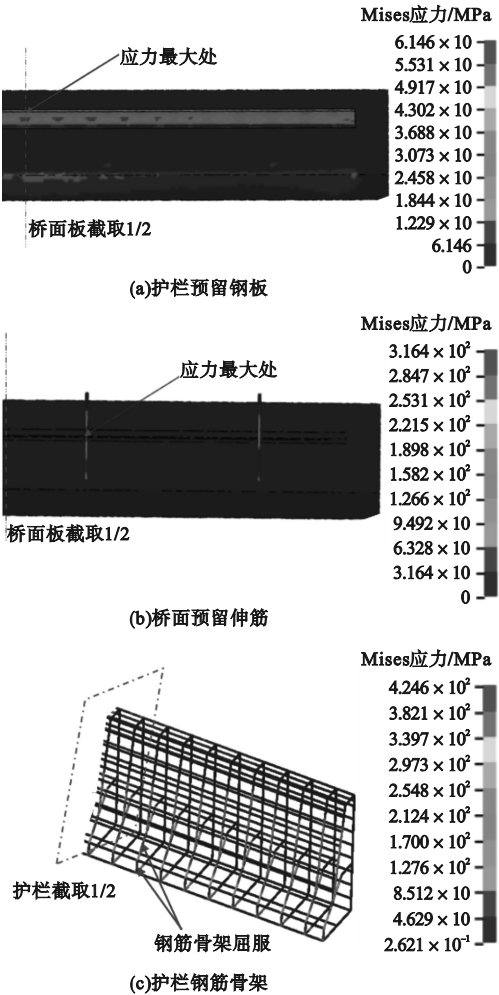


图9 方案一最大 Mises 应力云图

Fig. 9 The maximum Mises stress nephogram in scheme 1

方案二加载初期,倒 T 型钢板周围的混凝土出现应力集中。随着荷载增至 240 kN,护栏预留钢筋处的混凝土出现损伤,此区域周围混凝土的应力也相对较高。荷载达到 260 kN 时,护栏预留伸出钢筋的 Mises 应力达到屈服强度,由于桥面预留伸筋和护栏本身钢筋可以承担后续荷载,护栏结构还具备一定的承载能力。加载至 340 kN 时(见图

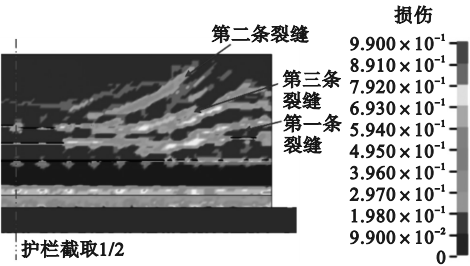


图8 方案一混凝土损伤分布云图

Fig. 8 The damage nephogram of concrete in scheme 1

10~图11),护栏的横向位移增长持续提升,桥面板混凝土出现损伤,护栏预留钢筋处的混凝土出现大面积的破坏,荷载传递至桥面板预留钢筋处,桥面板预留伸筋在其受剪处的应力也显著增长,并达到屈服强度,此时护栏达到准静态加载极限承载力 340 kN。整个过程倒 T 型钢 Mises 应力达到峰值 360.25 MPa,没有进入屈服阶段。

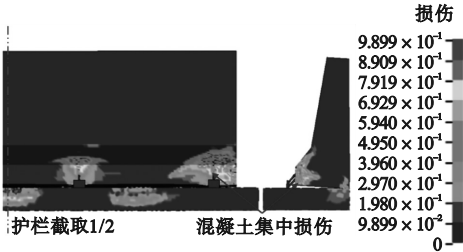


图 10 方案二混凝土损伤分布云图

Fig. 10 The damage nephogram of concrete in scheme 2

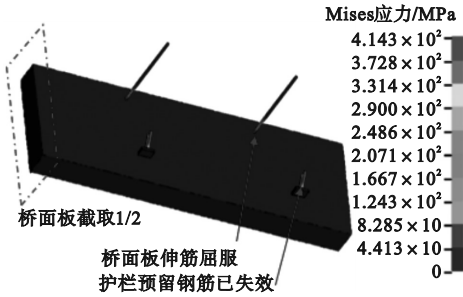


图 11 方案二连接钢筋最大 Mises 应力云图

Fig. 11 The maximum Mises stress nephogram of connecting rebar in scheme 2

方案三加载初期,后浇混凝土与桥面板连接处的应力增加较为明显,护栏结构总体处于弹性阶段。荷载增加到 160 kN 时,后浇混凝土与桥面板相接的中心处发生开裂。随着荷载的不断增加,该裂缝开始向两端延伸,直到发展成为一条贯穿整个护栏纵向长度的裂缝,后浇混凝土与桥面板开始发生相对位移。加载至 280 kN 时,护栏底部混凝土发生受拉破坏,同时护栏与桥面板开始分离。加载到 400 kN 时(见图 12~图 13),连接护栏与桥面的上下环型钢筋的 Mises 应力达到应力峰值 425.43 MPa,连接钢筋进入屈服阶

段,护栏横向位移急剧增加发生整体倾覆破坏,此时护栏达到承载能力极限状态。结构的损伤主要集中于护栏与后浇混凝土相接处,究其原因后浇混凝土锚固的连接方式不能均匀分散的水平荷载,连接处刚度较大导致连接处发生了应力集中。

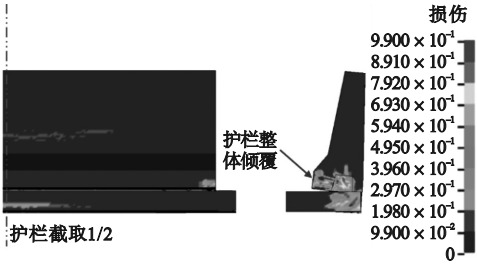


图 12 方案三混凝土损伤云图

Fig. 12 The damage nephogram of concrete in scheme 3

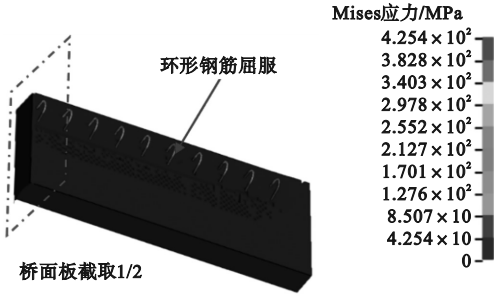


图 13 方案三桥面预留环形钢筋最大 Mises 应力云图

Fig. 13 The maximum Mises stress nephogram of reserved loop rebar in scheme 3

3.3 荷载-位移曲线与承载力分析

三种护栏在准静态加载作用下的荷载-位移曲线如图 14 所示,位移测点如图 6 所示,方案一水平静力最大荷载约为 600 kN,方案二约为 340 kN,方案三约为 400 kN。现行规范未明确规定装配式混凝土护栏准静态加载极限荷载,故参考规范<sup>[1]</sup>中 SA 级桥梁护栏汽车横向碰撞荷载标准值,取 410 kN 为 SA 级装配式护栏准静态加载荷载标准值。

施加静力荷载为 150 kN 以下时,方案一与方案三的荷载位移曲线基本重合,曲线的斜率大于方案二。说明在荷载施加初期,方案一与方案二的结构强度相近且高于方案



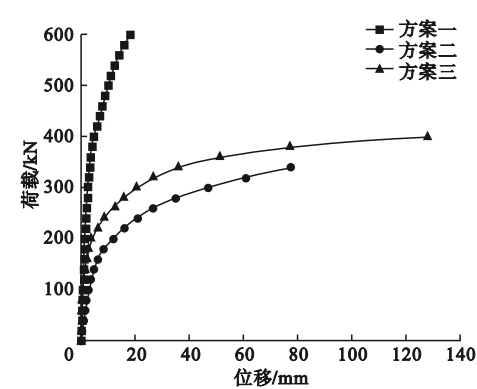


图 14 准静态加载下荷载 - 位移曲线

Fig. 14 The comparison of load-displacement curves under quasi-static loading

二。随着荷载的不断施加,接近 240 kN 时,方案三荷载位移曲线斜率显著变低,方案三与方案一侧向位移差距逐渐拉开,在一定程度上可以反映护栏的刚度差异。三种方案最大侧向位移分别是 18 mm、77 mm、129 mm,方案一约为方案二和方案三的 23% 和 14%。

表 3 制作工艺对比分析

Table 3 Comparative analysis of the production processes

竖向连接方案	主要工艺	施工复杂性	安装效率	相对生产成本
方案一	焊接 + 浆锚连接	桥面预留 H 型钢,对施工方无影响,焊接成本低,再进行浇筑	浆锚连接对孔精度不高,安装效率高	低
方案二	焊接 + 浆锚连接	倒 T 型钢板与护栏预留锚筋焊接;后期进行浇筑	浆锚连接对孔精度不高,安装效率高	低
方案三	双环锚固浇筑	双环锚固钢筋对位精度要求较高	安装时需要对位,需要浇筑,施工速度较慢	高

5 结 论

(1)通过有限元模拟与准静态中心加载分析,得到了三种装配式混凝土护栏竖向连接设计方案的极限承载力:预埋 H 型钢焊接与浆锚连接相结合为 600 kN,呈现倒梯形屈服破坏且没有立刻失效;预埋倒 T 型钢板焊接及浆锚连接相结合为 340 kN,“双环锚固”嵌固连接为 400 kN,这两种方案均出现应力集中并整体倾覆。预埋 H 型钢焊接与浆锚连接的竖向连接方式具有较好的力学性能,达到最大承载力时仍能保持一定的稳定性。

综合以上可以说明方案一护栏的结构刚度为三者最佳。

由上述分析可知,方案一完全满足 SA 级桥梁护栏的设计要求,方案二和方案三需要通过优化设计来提高护栏强度或者用于较低防护等级的护栏。

4 制作工艺与相对成本分析

从主要工艺、施工复杂性、安装效率对上述三种方案的相对生产成本进行对比分析<sup>[19]</sup>,结果如表 3 所示。方案一与方案二采用焊接和浆锚连接,焊接施工成本相对较低,而且灌浆对孔连接精度不高,故施工安装效率较高,成本相对较低。而方案三是通过在嵌固槽内预留环形钢筋连接,钢筋成环安装工作量大且精度较高,安装时需要対位,需要浇筑,施工速度较慢,成本相对较高。

(2)三种竖向连接方式护栏的荷载 - 位移曲线表明,当护栏达到最大承载力时,方案一顶部中心最大侧向位移约为 18 mm,分别为方案二和方案三的 23% 和 14%;方案一的整体曲线斜率与刚度相对最大,满足 SA 级别装配式防撞护栏承载力要求。

(3)从制备工艺方面,方案三需要双环锚固浇筑,而方案一和方案二均采用焊接与浆锚连接,其施工精度要求较低,生产成本较低,施工效率更高。

(4)综合考虑承载力、失效特点、施工工艺与生产成本,预埋 H 型钢焊接和浆锚连接

相结合的竖向连接方式为优选方案,可为装  
配式防撞护栏的研究与应用提供参考。

## 参考文献

- [1] 交通运输部公路科学研究院. 公路交通安全设施设计规范: JTG D81—2017 [S]. 北京: 人民交通出版社股份有限公司, 2017.  
(Research Institute of Highway in Ministry of Transport. Design specifications for highway safety facilities: JTG D81—2017 [S]. Beijing: China Communication Press Co. Ltd., 2017.)
- [2] 李嘉维, 夏樟华, 余舟扬. 灌浆套筒连接装配式混凝土双柱墩的双向拟静力试验研究[J]. 地震工程与工程振动, 2020, 40(3): 193–203.  
(LI Jiawei, XIA Zhonghua, YU Zhouyang. Bi-axial quasi-static test on grouting sleeve connected assembled concrete double-column piers [J]. Earthquake engineering and engineering dynamics, 2020, 40(3): 193–203.)
- [3] JIA J F, ZHANG K D, SAIIDI M S, et al. Seismic evaluation of precast bridge columns with built-in elastomeric pads [J]. Soil dynamics and earthquake engineering, 2020, 128: 105868.
- [4] 包龙生, 陶天阳, 刘杰, 等. 基于改进冲击回波法的装配式混凝土桥墩套筒灌浆检测理论研究[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2021, 37(6): 1082–1089.  
(BAO Longsheng, TAO Tianyang, LIU Jie, et al. Grouting detection theory of assembled concrete pier sleeve based on shock-echo method [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2021, 37(6): 1082–1089.)
- [5] 徐艳, 曾增, 葛继平, 等. 承插式预制拼装桥墩的最小合理承插深度[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2019, 47(12): 1706–1711.  
(XU Yan, ZENG Zeng, GE Jiping, et al. Minimum reasonable socket depth of precast pier-footing with socket connection [J]. Journal of tongji university (natural science), 2019, 47(12): 1706–1711.)
- [6] 贾俊峰, 赵建瑜, 张强, 等. 后张预应力节段拼装 CFST 桥墩抗侧力学行为试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 236–245.  
(JIA Junfeng, ZHAO Jianyu, ZHANG Qiang, et al. Experiment on lateral bearing behavior of post-tensioned segmental CFST bridge pier columns [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(3): 236–245.)
- [7] 贾俊峰, 赵建瑜, 张强, 等. 螺栓连接预制拼装 CFST 桥墩抗震性能试验[J]. 中国公路学报, 2017, 30(12): 242–249.  
(JIA Junfeng, ZHAO Jianyu, ZHANG Qiang, et al. Cyclic testing on seismic behavior of precast segmental CFST bridge piers with bolted connections [J]. China journal of highway and transport, 2017, 30(12): 242–249.)
- [8] 王宇, 梁云峰, 杨春燕, 等. 低周反复荷载下螺栓连接装配式混凝土梁的有限元分析[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2020, 36(2): 239–246.  
(WANG Yu, LIANG Yunfeng, YANG Chunyan, et al. Finite element analysis of bolted fabricated concrete beams under low reversed cyclic loading [J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science), 2020, 36(2): 239–246.)
- [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, 2015, 20(12): 4015014. 1–11.
- [10] 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.
- [11] DUCHESNEAU F, CHARRON J P, MASSICOTTE B. Monolithic and hybrid precast bridge parapets in high and ultra-high performance fibre reinforced concretes [J]. Canadian journal of civil engineering, 2011, 38(8): 859–869.
- [12] SENNAH K, HEDJAZI S. Structural qualification of a developed GFRP-reinforced TL-5 concrete bridge barrier using vehicle crash testing [J]. International journal of crashworthiness, 2019, 24(3): 296–313.
- [13] LEE J, JEONG Y, KIM K, et al. Experimental and numerical investigation of deformable concrete median barrier [J]. Materials, 2019, 12(19): 3176.
- [14] BASIT S, MAKI T, MUTSUYOSHI H, et al. Influence of reinforcement arrangement details on mechanical behavior of precast concrete barrier with loop connection [J]. Structures, 2020, 27: 1682–1692.
- [15] 黄逸锋. 桥梁装配式防撞护栏连接件优化设计研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.  
(HUANG Yifeng. Study on the optimal design of the connector of bridge prefabricated barrier [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2021.)
- [16] 张誉, 赵鸣. 钢筋混凝土防撞护栏实车冲撞试验研究[J]. 建筑结构, 1998(6): 24–27.  
(ZHANG Yu, ZHAO Ming. Experimental study on the vehicle impact of reinforced concrete crash barrier [J]. Building structure, 1998(6): 24–27.)
- [17] 曾翔. 冲击和快速加载作用下钢筋混凝土梁柱构件性能试验与数值模拟研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2014.  
(ZENG Xiang. Experimental and numerical study of behaviors of RC beams and columns under impact loadings and rapid loadings [D]. Changsha: Hu'nan University, 2014.)
- [18] 蒋键皓. UHPC 节段拼装混凝土护栏防撞性能研究[D]. 重庆: 重庆交通大学, 2022.  
(JIANG Jianguo. Research on the anti-collision performance of UHPC precast segmental concrete barrier [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2022.)
- [19] 张克, 蔡锦松, 黄清云. 装配式建筑质量影响因素相互关系研究[J]. 建筑经济, 2021, 42(10): 95–98.  
(ZHANG Ke, CAI Jinsong, HUANG Qingyun. Study on the relationship between the factors affecting the quality of prefabricated building [J]. Construction economy, 2021, 42(10): 95–98.)
- (责任编辑: 刘春光 英文审校: 范丽婷)