

宿迁市运河文化桥现状老桥护栏提升改造设计及应用

赵晓龙^{1,2}

[1.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200092; 2.上海市政工程设计研究总院(集团)有限公司天津分公司,天津市 300220]

摘 要:随着经济和社会的发展,城市道路的快速化改造工程越来越多。由于新建道路设计时速及标准均有提高,既有现状老桥的防撞护栏等级已经不能满足新建城市快速路标准的要求,需要对现有老桥防撞护栏进行提升改造。以宿迁市迎宾大道二期快速化改造工程为例,介绍了现状运河文化桥老桥防撞护栏的提升改造设计方案,并采用屈服线分析和强度设计理论及非弹性分析方法进行了计算分析。在实际工程应用中,取得了良好的效果,以期为类似的现状老桥护栏提升改造项目提供借鉴。

关键词: 混凝土护栏; 组合式护栏; 屈服线分析和强度设计理论; 非弹性分析方法; 植筋

中图分类号: U445.6

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2024)06-0115-05

1 工程概况

宿迁市运河文化桥现状老桥道路等级为具有主干路功能的一级公路。设计时速为 60 km/h, 汽车荷载为公路 I 级。机非分隔带防撞护栏采用 Am 级钢筋混凝土护栏, 中央分隔带防撞护栏采用 A 级组合式护栏。原护栏构造如图 1、图 2 所示。

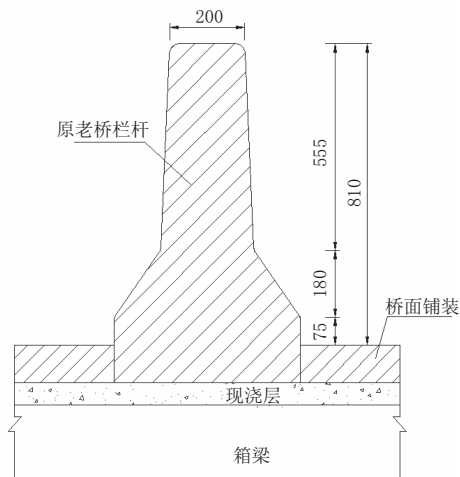


图 1 现状老桥 Am 级混凝土护栏(单位:mm)

本新建迎宾大道二期快速化改造工程与现状运河文化桥老桥相接，主线双向 6 车道，设计速度 80 km/h,采用城市快速路标准。由于新建道路设计时速及标准均有提高，既有现状老桥的防撞护栏等级已经不能满足新建城市快速路标准的要求，需要

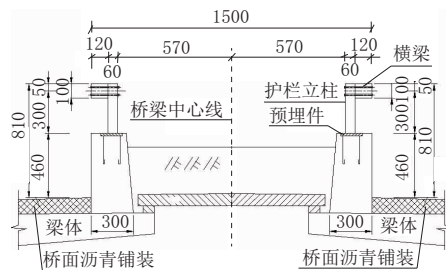


图 2 现状老桥 A 级组合式护栏(单位:mm)

对既有老桥防撞护栏进行提升改造。根据规范要求,老桥的防撞护栏等级需要改造为 SA、SA_m 级^[1-2]。

2 提升改造设计原则

通过对现状老桥防护设施进行充分调研后,提升改造设计坚持以下原则。

(1)提升改造方案应统筹考虑桥梁主体结构的安全性、美观性,避免因增设或提升护栏等级而影响桥梁主体结构的安全性及桥梁的美观效果。

(2)提升改造方案应充分利用既有护栏设施,通过优化设计,尽量降低工程造价。

(3)提升改造方案应加强新建桥梁与现状桥梁段、相邻路基段衔接处安全防护设施的过渡段及端部设计^[3]。

3 提升改造设计方案

3.1 钢筋混凝土护栏提升改造设计方案

对于老桥机非分隔带 Am 级钢筋混凝土防撞护栏,可在顶部植筋浇筑混凝土,增加护栏的整体高度,

收稿日期：2023-06-10

作者简介: 赵晓龙(1981—), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事桥梁设计工作。

改造为 SAm 级钢筋混凝土防撞护栏高度。同时,针对增大的护栏荷载和碰撞荷载对护栏和桥面板承载能力进行验算。经验算通过后,加高混凝土护栏:将现有护栏混凝土顶面凿毛并进行植筋,并在新、旧混凝土之间涂刷界面剂,浇筑加高 19 cm 的混凝土,提升至满足 SAm 级护栏高度。植筋 1 a 号钢筋采用直径 12 mm 的 HRB400 钢筋间距 100 mm,植筋锚固深度为 390 mm;2 a 号钢筋采用直径 12 mm 的 HRB400 钢筋 6 根。老桥护栏改造提升后,构造配筋如图 3、图 4 所示。

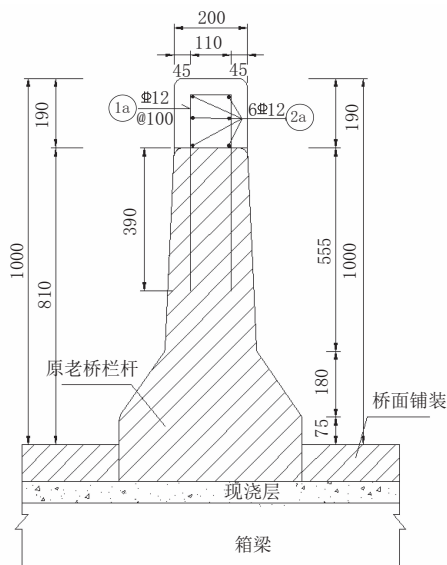


图 3 改造后 SAm 级构造(单位:mm)

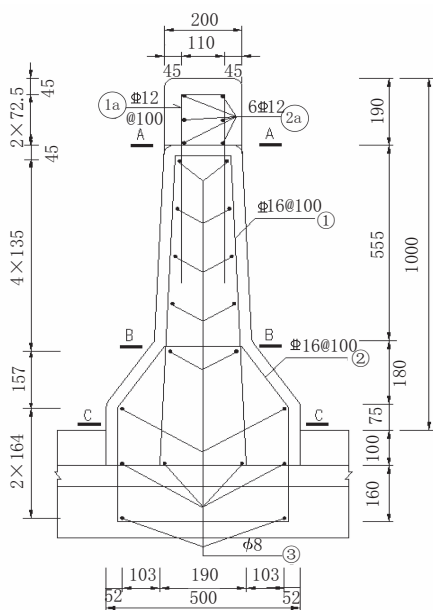


图 4 改造后 SAm 级钢筋(单位:mm)

3.2 组合式防撞护栏提升改造设计方案

对于老桥中央分隔带 A 级组合式防撞护栏,由于现状老桥中央分隔带有绿化,考虑对现状老桥的结构及景观影响最小,可拆除老桥原有钢结构部分

护栏,采用加高后的组合钢护栏进行替换,改造为SA级组合式护栏高度。同时,针对增大的护栏荷载和碰撞荷载对护栏和桥面板承载能力进行验算。经验算通过后,加高组合式护栏:将现有护栏混凝土顶面钢护栏进行拆除,保留原锚垫板等预埋件,增加新的钢结构护栏与原预埋钢板进行焊接,提升至满足SA级组合护栏高度。老桥护栏改造提升后,构造配筋如图5所示。

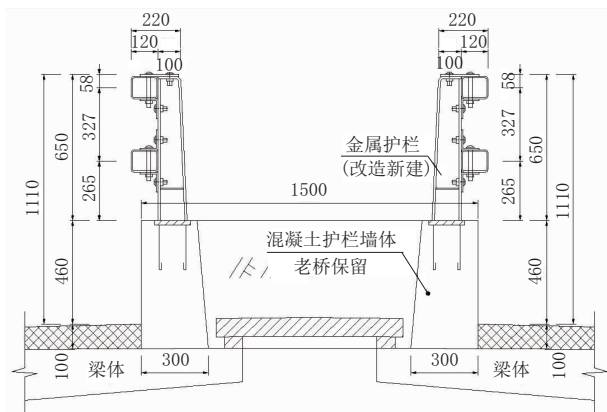


图 5 改造后 SA 级组合式防撞护栏构造(单位:mm)

4 护栏及桥面板悬臂设计验算

按照规范规定的护栏试验构件设计程序^[1]对改造后的护栏和既有现状老桥悬臂板进行设计验算。验算通过后,依据设计方案对现状护栏进行改造。

4.1 钢筋混凝土护栏设计验算

钢筋混凝土护栏可采用屈服线分析和强度设计理论,即按照护栏配筋,计算出护栏对横向荷载的抗力标准值,应大于出现在护栏上的横向碰撞力。且按照屈服线分析理论,要求屈服线破坏模式发生在护栏以内,即桥面板必须有足够的承载力,保证在横向碰撞破坏时,不延伸至桥面板^[1]。

4.1.1 改造后护栏设计参数

护栏混凝土等级:C30 混凝土。

护栏钢筋等级:1号、2号钢筋采用直径16 mm的HRB335钢筋间距100 mm,3号钢筋采用直径8 mm的R235钢筋。1a号钢筋采用直径12 mm的HRB400钢筋间距100 mm,2a号钢筋采用6根直径12 mm的HRB400钢筋。

防护等级:SA_m 级。

横向碰撞荷载 410 kN, 分布长度 2.4 m。

4.1.2 计算简图

根据护栏竖向断面的不规则断面及破坏形式按照图 4 可以划分为 A-A、B-B、C-C 断面。

护栏发生碰撞混凝土破坏的可能形式如图 6 所

示。第一种破坏形式发生在护栏的 C-C 断面, 第二种破坏形式发生在护栏的 B-B 断面。

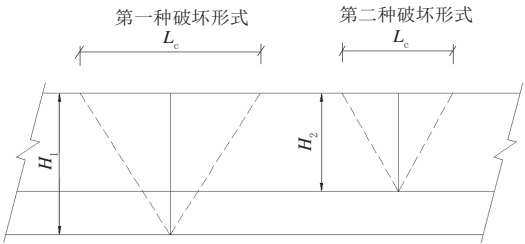


图6 护栏发生碰撞混凝土破坏形式

4.1.3 计算结果

(1) 护栏纵向轴的弯曲承载力矩 M_c 计算见表1。

表1 纵向轴的弯曲承载力矩 M_c 计算

截面位置	截面厚 H/m	x/mm	抗弯能力 $M_c/(\text{N}\cdot\text{mm})$
A 截面	200	33.5	103 172.6
B 截面	250	33.5	136 833.4
C 截面	500	33.5	305 137.4
破坏形式 1			145 753.5
破坏形式 2			120 003.0

(2) 护栏竖向轴的弯曲承载力矩 M_w 计算见表2。

表2 竖向轴的弯曲承载力矩 M_w 计算

截面位置	截面平均厚 H/m	x/mm	抗弯能力 $M_w/(\text{N}\cdot\text{mm})$
B 截面之上	225	5.5	14 234 780
B 截面—截面 C	375	4.6	7 609 000
竖向抗弯能力 M_w			21 843 780

(3) 护栏横梁附加弯曲承载力矩 M_b 计算。
护栏顶部无横梁, $M_b=0$ 。

(4) 碰撞发生在护栏标准段时抗力 R_w 计算:

破坏形式 1: 护栏高度 $H=1\,000\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\,824\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=823.4\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

破坏形式 2: 护栏高度 $H=745\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\,400\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=868.1\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

(5) 碰撞发生在栏端部或伸缩缝处时抗力 R_w 计算。

破坏形式 1: 护栏高度 $H=1\,000\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\,461\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=717.4\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

破坏形式 2: 护栏高度 $H=745\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\,400\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=785\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

4.2 组合式护栏设计验算

4.2.1 改造后组合式护栏设计参数

老桥护栏混凝土等级: C30 混凝土。

现状老桥护栏钢筋等级: 1 号钢筋采用直径 12 mm 的 HRB335 钢筋间距 150 mm , 2 号钢筋采用 8 根直径 10 mm 的 R235 钢筋。改造前 A 级组合式护栏基础配筋如图 7 所示。

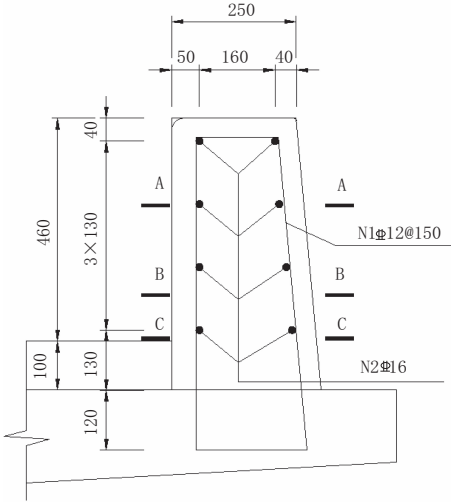


图7 改造前 A 级组合式护栏基础配筋 (单位: mm)

Q355C 钢屈服强度: $f_y=355\text{ MPa}$, 立柱间距 2 m 。
防护等级: SA 级。

横向碰撞荷载 410 kN , 分布长度 2.4 m 。

4.2.2 钢结构部分计算

(1) 非弹性屈服线弯曲承载力矩 M_{post} 计算见表3。

表3 非弹性屈服线弯曲承载力矩 M_{post} 计算

参数	横梁 1	横梁 2	立柱根部
壁厚 / mm	6	6	6
梁宽 / mm	100	100	120
梁高 / mm	120	120	120
对应屈服弯矩 / (kN·m)	30.5	30.5	20.8
横梁弯曲承载力矩 $M_p/(\text{kN}\cdot\text{m})$	30.5	30.5	
单根立柱弯曲承载力矩 $M_{\text{post}}/(\text{kN}\cdot\text{m})$		61.0	20.8

(2) 与 M_{post} 对应的单根立柱承受的剪力 P_p 计算见表4。

表4 单根立柱承受的剪力 P_p 计算

参数名称	立柱高度 H_R/m	横梁形心 H_{R1}/m	混凝土高 H_w/m	立柱间距 L/m	P_p/kN
参数值	0.65	0.429	0.46	2.00	48.6

(3) 护栏的极限抗力 R 计算。

a. 破坏模式中未包含端部立柱式。

破坏模式包含奇数跨 N 时, 护栏的极限抗力 R 计算见表5。

表5 护栏的极限抗力 R 计算

N	1	3	5	7
R/kN	610.9	182.8	188	220.3

破坏模式包含偶数跨 N 时, 护栏的极限抗力 R 计算见表 6。

表 6 护栏的极限抗力 R 计算				
N	2	4	6	8
R/kN	243.9	186.1	207.1	243

护栏系统的承载能力有上述计算中的最小 N 值来确定, 该护栏系统的承载极限抗力 $R=182.8\text{ kN}$ 。

破坏模式下端立柱的荷载检查: 破坏模式护栏系统的承载能力由 3 跨进行控制。

破坏模式加的立柱数 $=N-1=3-1=2$;
失效立柱的荷载 $=2\times P_p=2\times 48.6=97.2\text{ kN}$;
破坏模式下的每端立柱荷载 $=(182.8-97.2)/2=42.8\text{ kN}$, 小于 $P_p=48.6\text{ kN}$, 满足规范要求。

b. 破坏模式中包含端部立柱式。
对任意数量的横梁跨数 N 时, 护栏的极限抗力 R 计算见表 7。

表 7 护栏的极限抗力 R 计算								
N	1	2	3	4	5	6	7	8
R/kN	198	126	134	152	173	195	217	240

该护栏系统的承载极限抗力最小值 $R=126\text{ kN}$ 。
4.2.3 计算简图
根据护栏竖向断面的不规则断面及破坏形式按照图 7 可以划分为 A-A、B-B、C-C 断面。

4.2.4 计算结果
(1) 护栏纵向轴的弯曲承载力矩 M_c 计算见表 8。

表 8 纵向轴的弯曲承载力矩 M_c 计算			
截面位置	截面厚 H/m	x/mm	抗弯能力 $M_c/(\text{N}\cdot\text{mm})$
A 截面	267	12.6	52 971.1
B 截面	283	12.6	57 012.5
C 截面	300	12.6	61 306.4
破坏形式 1			56 405.8
破坏形式 2			54 991.8

(2) 护栏竖向轴的弯曲承载力矩 M_w 计算见表 9。

表 9 竖向轴的弯曲承载力矩 M_w 计算			
截面位置	截面平均厚 H/m	x/mm	抗弯能力 $M_w/(\text{N}\cdot\text{mm})$
B 截面之上	267	7.4	11 117 157
B 截面—截面 C	292	4.8	41 912 489
竖向抗弯能力 M_w			15 308 406

(3) 护栏横梁附加弯曲承载力矩 M_b 计算。
护栏顶部无横梁, $M_b=0$ 。
(4) 碰撞发生在护栏标准段时抗力 R_w 计算。

破坏形式 1: 护栏高度 $H=560\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\ 830\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=570.0\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

破坏形式 2: 护栏高度 $H=370\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\ 400\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=787.5\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

(5) 碰撞发生在栏端部或伸缩缝处时抗力 R_w 计算。

破坏形式 1: 护栏高度 $H=560\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\ 462\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=495.9\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

破坏形式 2: 护栏高度 $H=370\text{ mm}$ 时, 屈服线发生的临界长度 $L_c=2\ 400\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=722.7\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

(6) 组合护栏承载力合成计算。
碰撞发生在金属横梁跨中时:

$$\begin{aligned}\overline{R} &= R_R + R_w = 182.7 + 570 = 753\text{ kN} \\ \overline{Y} &= \frac{R_R + H_R + R_w H_w}{R} = \\ &= \frac{182.7 \times (0.429 + 0.46) + 570 \times 0.46}{753} = 0.56\text{ m} \\ \text{碰撞发生在立柱处时:} \\ R_w' &= \frac{R_w H_w - P_p H_R}{H_w} = \\ &= \frac{570 \times 0.46 - 48.6 \times (0.429 + 0.46)}{0.46} = 476.2\text{ kN} \\ \overline{R} &= P_R + R_R' + R_w' = 186.1 + 570 + 476.2 = 1\ 232.4\text{ kN} \\ \overline{Y} &= \frac{P_p H_R + R_R' H_R + R_w' H_w}{R} = \\ &= \frac{(186.1 + 476.2) \times (0.429 + 0.46) + 476.2 \times 0.46}{753} = \\ &= 0.66\text{ m}\end{aligned}$$

可见, 碰撞发生在金属横梁跨中时, 最不利 $\overline{R}=753\text{ kN}$, 大于 410 kN , 满足规范要求。

4.3 桥面板悬臂验算
现状老桥引桥采用小箱梁结构, 小箱梁悬臂板横向受力钢筋采用 20 号及 18 号钢筋。20 号钢筋采用直径 16 mm 的 HRB335 钢筋间距 100 mm, 18 号钢筋采用直径 12 mm 的 HRB335 钢筋间距 100 mm。

钢筋混凝土护栏对应的桥面板悬臂计算如下。

4.3.1 桥面板悬臂验算状态 I
碰撞发生在护栏标准段, 为第一种破坏模式, 验算悬臂板根部截面。

(1) 计算悬臂板状态 I 下悬臂板根部截面混凝

土发生破坏时引起的悬臂板弯矩 M_u 。

护栏高度 $H=1\ 000\text{ mm}$ 时,屈服线发生的临界长度 $L_c=3\ 064\text{ mm}$, 护栏对横向荷载的抗力标准值 $R_w=760.3\text{ kN}$, 护栏破坏时引起的悬臂板内拉力 $T=138.5\text{ kN/m}$ 。

护栏引起的弯矩 $M_b=6.17\text{ kN}\cdot\text{m}$,

桥面板引起弯矩 $M_s=2.02\text{ kN}\cdot\text{m}$,

碰撞力弯矩 $M_c=145.8\text{ kN}\cdot\text{m}$,

总弯矩合计值: $M_u=6.17+2.02+145.8=153.9\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(2)计算悬臂板状态 I 下悬臂板根部截面混凝土发生破坏时悬臂板的承载能力弯矩 M_n :

悬臂板根部混凝土的压力 $C=874\text{ kN/m}$,

悬臂板混凝土受压区高度 $x=27.5\text{ mm}$,

悬臂板弯矩 $M_n=191.1\text{ kN}\cdot\text{m}$, 大于 $M_u=153.9\text{ kN}\cdot\text{m}$,

状态 I 截面承载能力满足规范要求。

4.3.2 桥面板悬臂验算状态 II

(1)计算悬臂板状态 II 下悬臂板根部截面混凝土发生破坏时引起的悬臂板弯矩 M_u :

护栏引起的弯矩 $M_b=6.17\text{ kN}\cdot\text{m}$,

桥面板引起弯矩 $M_s=2.02\text{ kN}\cdot\text{m}$,

竖向碰撞荷载取 25t 货车碰撞力弯矩 $M_c=15.1\text{ kN}\cdot\text{m}$,

总弯矩合计值: $M_u=6.17+2.02+15.1=23.2\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

(2)计算悬臂板状态 II 下悬臂板根部截面混凝土发生破坏时悬臂板的承载能力弯矩 M_n :

悬臂板混凝土受压区高度 $x=31.8\text{ mm}$,

悬臂板弯矩 $M_n=203.2\text{ kN}\cdot\text{m}$, 大于 $M_u=23.2\text{ kN}\cdot\text{m}$,

状态 II 截面承载能力满足规范要求。

组合式护栏对应的桥面板悬臂验算经计算满足规范要求,计算过程在此不再赘述。

5 实际工程应用

5.1 钢筋混凝土护栏实际应用

将现有护栏混凝土顶面凿毛并进行植筋,同时在新、旧混凝土之间涂刷界面剂,浇筑加高 19 cm 的混凝土,提升至满足 SAm 级护栏高度。植筋 1 a 号钢筋采用直径 12 mm 的 HRB400 钢筋间距 100 mm,植筋锚固深度为 390 mm;2 a 号钢筋采用直径 12 mm 的 HRB400 钢筋 6 根。为了避免新、旧混凝土色差影响桥梁美观,对现状老桥混凝土护栏进行涂装。现状老桥钢筋混凝土护栏改造后的实际效果如图 8 所示。



图 8 改造后 SAm 级钢筋混凝土护栏实际效果

5.2 组合式护栏实际应用

将现有护栏混凝土顶面钢护栏进行拆除,保留原锚垫板等预埋件,增加新的钢结构护栏与原预埋钢板进行焊接,提升至满足 SA 级组合护栏高度。现状老桥组合式护栏改造后的实际效果如图 9 所示。



图 9 改造后 SA 级组合式护栏实际效果

6 结 语

本文采用屈服线分析和强度设计理论^[1]及非线性分析方法^[1]对现状老桥的两种护栏改造进行了计算分析,提出了合理的改造方案。通过优化设计,充分利用了现状老桥的材料性能,降低了工程造价,对桥梁主体结构没有影响,且达到了一定的美观性,取得了较好的实际应用效果,以期为类似的现状老桥护栏提升改造项目提供借鉴。

参考文献:

- [1] JTG/T D81—2017,公路交通安全设施设计细则[S].
- [2] JTG D81—2017,公路交通安全设施设计规范[S].
- [3] 赛志毅.高速公路护栏改造关键技术与应用[M].北京:人民交通出版社,2018.