

基于仿真分析的桥梁组合式护栏设计优化

赵庆云¹, 张运清¹, 孟涛¹, 卜倩森²

(1. 山东省交通规划设计院, 山东 济南 250031; 2. 交通运输部公路科学研究院)

摘要: 为提升大量在用的 NJ 型桥梁护栏防护等级,按照增设金属横梁及防阻块增强变形吸能的思路,兼顾施工方便及改造成本,利用三维有限元仿真分析方法,对 6 种护栏提升改造方案逐一进行了分析和优化,最终确定了一种安全、适用、经济的组合式护栏方案,并将其应用于实际工程,达到了预期效果。

关键词: 桥梁护栏; 组合式护栏; 碰撞条件; 仿真分析; 防护等级

1 引言

目前,中国桥梁护栏常用的形式主要有钢筋混凝土墙式护栏、金属梁柱式护栏和组合式护栏。钢筋混凝土墙式护栏为刚性护栏,一般迎撞面设置为坡面,利用车辆爬高将车辆的动能转换为势能,该类护栏耐久性好,养护方便,但自重较大,对桥面板连接强度要求高;金属梁柱式护栏属半刚性护栏,自重轻,通透美观,

通过横梁变形吸能可有效减小碰撞荷载,但该类护栏造价较高,防落物能力较差。

组合式护栏兼顾刚性与柔性,既可通过上部结构变形吸能大大减小传递至桥面板的碰撞荷载,又可延迟并抑制车辆在混凝土基座护栏的坡面爬升而减小翻车概率。传统的组合式护栏一般为混凝土护栏+一根钢管横梁,且 2006 年以前修建的桥梁混凝土护栏基座多采用 NJ 型护栏(图 1)。NJ 型护栏的下坡面坡度小,变坡点距离地面较高,容易导致车辆倾覆或车体严

较小;同一开口随着施工阶段呈锯齿状变化,总体呈下降趋势,趋近于 0,主索鞍顶推对开口宽度影响很小。

参考文献:

- [1] 郑宪政. 悬索桥架设过程结构分析方法[C]. 中国土木工程学会桥梁及结构工程学会第十三届年会论文集(上册),1998.
- [2] Süleyman Adanur, Murat Günaydin. Construction Stage Analysis of Bosphorus Suspension Bridge[C]. Proceeding of 9th International Congress on Advances in Civil Engineering,2010;5 492—5 505.
- [3] Murat Günaydin, Süleyman Adanur. Construction Stage Analysis of Fatih Sultan Mehmet Suspension Bridge[J]. Structural Engineering and Mechanics,2012,42(4):489—505.
- [4] Murat Günaydin, Süleyman Adanur, Ahmet Can A—ltunışık. Determination of Structural Behavior of Bosphorus Suspension Bridge Considering Construction Stages and Different Soil Conditions[J]. Steel and Composite Struc-

tures,2014,17(4):405—429.

- [5] 李小珍,胡大琳,陈祥宝. 大跨度悬索桥施工状态的计算机仿真分析[J]. 中国公路学报,1998(4).
- [6] 陈彩霞. 悬索桥钢箱加劲梁安装过程及临时连接的研究[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2007.
- [7] 陆文亮. 三塔悬索桥钢箱梁架设方案研究及施工过程分析[D]. 西南交通大学硕士学位论文,2009.
- [8] 姚增峰. 龙江桥钢箱加劲梁安装过程焊接时机及顺序的研究[D]. 重庆交通大学硕士学位论文,2016.
- [9] 柯红军. 复杂悬索桥合理设计及合理施工状态确定[D]. 长沙理工大学博士学位论文,2014.
- [10] 钟继卫. 大跨度悬索桥钢箱梁吊装精细化分析[J]. 桥梁建设,2010(6).
- [11] 葛俊颖. 桥梁工程软件 Midas Civi 使用指南[M]. 北京:人民交通出版社,2013.
- [12] 许世展. 桃花峪黄河大桥主桥成桥状态确定及基准索股架设[J]. 中外公路,2013(4).
- [13] 杨兴旺. 大跨度斜拉桥施工全过程非线性行为研究[D]. 西南交通大学博士学位论文,2007.

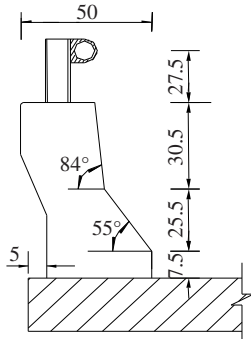


图 1 在用组合式护栏典型构造(NJ 型坡面)(尺寸单位:cm)

重破坏,这在中国的路用实践中也得到证明,新规范不推荐使用 NJ 型护栏;传统组合式护栏防护等级较低,规范中最高等级为 SA 级,且由于单根金属横梁吸能效果有限,在车辆碰撞时,碰撞载荷仍会较大地传递到桥面板,容易导致桥面板损伤。

针对既有护栏的提升改造,近年来中国做了一些研究,涉及增设吸能装置、研发新型梁柱式钢护栏及优化混凝土护栏结构等,为既有护栏改造积累了宝贵的经验。该文研究依据尽可能保留利用原护栏并充分利用金属梁柱变形吸能的原则,利用计算机仿真分析逐一优化组合式护栏方案,最终得到推荐方案并通过依托工程进行实践。

2 护栏提升改造技术思路

为实现将原低等级 NJ 型护栏提升改造为 SS 级护栏的目标,需要满足以下两个要求:① 须保证护栏在文献[5]中规定的试验条件、试验方法下各项指标满足要求;② 应保证在 SS 级标准碰撞荷载作用下与护栏连接的桥面板及主梁不破坏。为有效减少碰撞荷载向桥面板传递,采取逐次增加钢横梁数量和增设立柱与横梁间防阻块两种思路,兼顾尽可能保留原护栏、节约材料成本等因素,对护栏提升改造方案逐一进行有限元仿真分析,直至得到最优的组合式护栏方案。

3 梁柱式护栏构造设计

在梁柱式护栏系统中,竖向净空设计不合理易引起车辆绊阻。参考美国 AASHTO LRFD 桥梁设计规范,文献[6]引入了桥梁金属梁柱式护栏构件规格和设计位置的选取标准。与立柱后退距离对应的横梁净距宜位于图 2 所示阴影区域或以上;与立柱后退距离对应的横梁总高度之和与立柱高度之比宜位于图 3 所示

的阴影区域或以上。该文中 6 种组合式护栏方案的上部梁柱系统的构件布置数据如表 1 所示,均位于上述优选或可选区域。

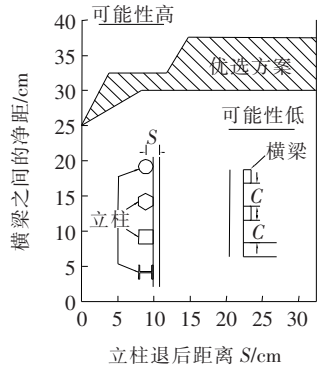


图 2 车轮、保险杠或发动机罩直接撞击立柱的可能性

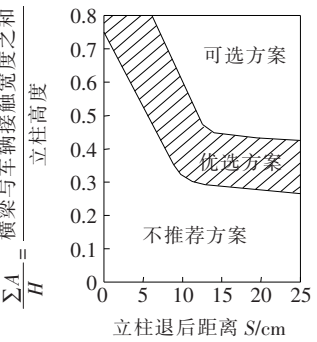


图 3 立柱后退距离标准

表 1 改造方案上部梁柱系统构件布置

方案	立柱后退距离	中(下)横梁净距	$\Sigma A/H$
	S/cm	C/cm	
1	10.0	15	0.36
2	30.4	15	0.36
3	10.0	20(15)	0.33
4	26.6	20(15)	0.33
5	30.0	25(15)	0.53
6	30.0	20	0.53

4 仿真分析及方案优化

4.1 碰撞条件

碰撞条件包括碰撞车型、车辆质量、碰撞速度、碰撞角度,可按下式计算碰撞能量表征护栏设防能力。

$$E = \frac{1}{2} m (v \sin \theta)^2 \tag{1}$$

式中: E 为碰撞能量; m 为车辆质量; v 为碰撞速度; θ 为碰撞角度。

对依托工程的 3 条高速公路交通量及不同车型车辆数量进行调查统计,车辆分布情况如表 2 所示,18 t 以下中小型车辆占比超过 80%,30 t 以上特大货车占比小于 10%。

表 2 不同车型车辆占有率

车型	高速公路 1		高速公路 2		高速公路 3	
	车辆/辆	占比/%	车辆/辆	占比/%	车辆/辆	占比/%
小客车(2 t 以下)	8 087	67	9 349	74	8 908	55
小货车(2.5 t 以下)	638	5	554	4	706	4
中货(2~10 t)	816	7	531	4	2 243	14
大客(2.5~18 t)	661	5	434	3	867	5
大货(10~30 t)	1 198	10	1 001	8	2 363	15
特大货(30 t 以上)	631	5	837	7	1 068	7
车辆总数	12 032	100	12 705	100	16 153	100

表 2 中高速公路 1、3 的设计速度为 120 km/h,高速公路 2 的设计速度为 100 km/h,参考规范对中国 33 条高速公路的调研数据,考虑碰撞时司机采取制动措施,取运行速度的 0.8 倍作为碰撞速度,偏安全取小客车为 100 km/h,大客车为 80 km/h,大货车为 60 km/h 进行计算。参考美国护栏碰撞条件(NCHRP350)并结合中国规范对近千个碰撞事故的调研数据,计算碰撞能量时特大货车碰撞角度取 15°,其余车型取 20°。按上述碰撞条件计算得到碰撞能量如表 3 所示。

表 3 不同碰撞条件的碰撞能量

车型	碰撞速度/(km·h ⁻¹)	碰撞角度/(°)	质量/t	碰撞能量/kJ	SS 级设计防撞能量/kJ
小客车	100	20	2.0(1.5)	90(68)	520
小货车	100	20	2.5	113	
中货车	80	20	10.0	289	
大客车	80	20	18.0	520	
大货车	60	20	30.0(33.0)	487(536)	
特大货车	60	15	55.0	512	

由表 3 可知:33 t 大型货车碰撞能量最大,满足 SS 级设计防撞能量要求;小客车速度最快,理论上质量越小,碰撞时加速度越大,取 1.5 t 小客车评价护栏缓冲性能是偏安全的;大型客车碰撞能量比大型货车略小,但按文献[5]中计算横向碰撞力时往往大型客车数值较大,且客车有效高度高,对护栏抗倾覆性能的检验很有必要。

综合分析,分别从最大碰撞能量、最大加速度、最大横向碰撞力及抗倾覆性能等方面考虑,选择小型客车、大型客车、大型货车 3 种车型进行仿真分析,碰撞条件如表 4 所示。

表 4 试验碰撞条件

车辆类型	车辆重量/t	车辆速度/(km·h ⁻¹)	碰撞角度/(°)
小型客车	1.5	100	20
大型客车	18.0	80	
大型货车	33.0	60	

按照依托工程设计图纸,建立 T 形主梁及提升改造护栏三维有限元模型,按照表 4 碰撞条件选择标准车辆进行模拟碰撞计算。

4.2 二横梁方案(方案 1、方案 2)

保持原有混凝土底座不变,上部增加钢法兰立柱及两道钢横梁,使改造护栏的总高度为 120 cm;按照立柱与横梁之间是否设置防阻块分为方案 1(无防阻块)和方案 2(设置防阻块),如图 4 所示。

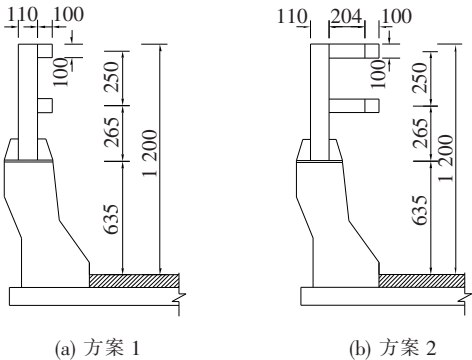


图 4 二横梁方案(单位:mm)

按照文献[5]中对试验碰撞条件的规定,针对方案 1、2 护栏分别进行了小型客车、大型客车、大型货车的

仿真碰撞试验,仿真分析结果见表 5。

表 5 仿真分析结果(方案 1、2)

碰撞车辆	方案 1	方案 2
小型客车	车辆顺利导出,桥面板及主梁未破坏	车辆顺利导出,桥面板及主梁未破坏
大型客车	桥面板撕裂,车辆顺利导出	车辆顺利导出,桥面板及主梁未破坏
大型货车	混凝土护栏破坏严重,桥面板撕裂,车辆顺利导出	桥面板及主梁开裂,车辆顺利导出

在大型客车和大型货车碰撞作用下,方案 1 护栏与翼缘板接缝处桥面板出现了撕裂现象。方案 2 由于在护栏与立柱间增设防阻块,进一步减小了车辆碰撞力,可满足大型客车碰撞要求。但在大型货车碰撞护栏过程中,不仅出现桥面板撕裂,由于车辆与桥梁护栏碰撞后产生幅值较大的应力波并传播到 T 形梁自由端,在自由端发生反射,产生幅值翻倍的拉应力,使 T 形主梁混凝土也发生了局部破坏。综上仿真分析结果可知,方案 1、2 碰撞车辆均可顺利导出,但桥面板及主梁发生破坏,存在较大的安全隐患。

4.3 三横梁方案(方案 3、4)

进一步改进桥梁护栏的结构形式,钢横梁增加至 3 道。将原有混凝土底座高度凿除至 30 cm,上部增加法兰立柱及三道钢横梁,护栏总高度为 120 cm,按照立柱与横梁之间是否设置防阻块分为方案 3(无防阻块)和方案 4(设置防阻块),如图 5 所示。

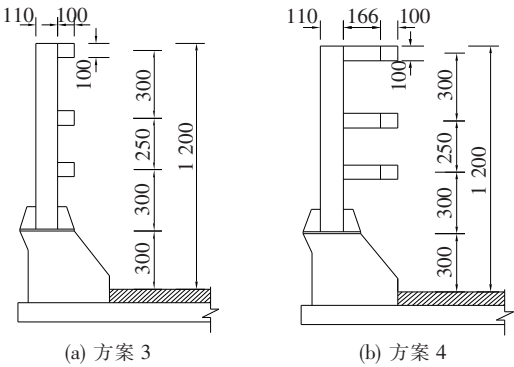


图 5 三横梁方案(单位:mm)

按照文献[5]中对试验碰撞条件的规定,针对方案 3、4 护栏分别进行了小型客车、大型客车、大型货车的仿真碰撞试验,仿真分析结果见表 6。

在大型货车碰撞作用下,方案 3 桥面板及主梁出现了类似方案 2 的裂缝。方案 3 总体防护性能达到六级(SS级)要求,但桥面板及主梁发生破坏,存在较大

表 6 仿真分析结果(方案 3、4)

碰撞车辆	方案 3	方案 4
小型客车	车辆顺利导出,桥面板及主梁未破坏	车辆顺利导出,桥面板及主梁未破坏
大型客车	护栏基座较大程度破坏,车辆顺利导出	车辆顺利导出,桥面板及主梁未破坏
大型货车	护栏基座较大程度破坏,桥面板及主梁开裂,车辆顺利导出	护栏基座一定程度破坏,车辆顺利导出,桥面板及主梁未开裂

的安全隐患。方案 4 中护栏的每根立柱由于增设 3 处防阻块,桥面板和主梁均未发生破坏,碰撞车辆顺利导出,防护性能达到六级(SS 级)要求,但是大型客车碰撞护栏后存在翻车风险。

4.4 推荐方案(方案 5、6)

由于大型客车碰撞护栏(方案 4)后存在翻车风险,因此有必要对改造方案进一步优化:① 消除可能发生的翻车问题;② 从方案的经济性和施工便捷性考虑,尽量不改变原有混凝土底座结构,通过附加其他结构的方式进行改造。综上进一步优化后为方案 5:保

持原有混凝土底座不变,上部增加两道钢横梁并设置防阻块,侧方增加一道钢横梁及防阻块,改造护栏最终的总高度为 120 cm,如图 6(a)所示。

方案 1~5 主要解决混凝土墙的变坡点至顶面高度为 30.5 cm(混凝土护栏总高 63.5 cm)的桥侧护栏升级改造问题。方案 5 为较优的改造方案,为了进一步扩展方案 5 的适用性,有必要选择变坡点至顶面高度为 48 cm(混凝土护栏总高 81 cm)的桥侧护栏按照方案 5 的思路进行改造设计,即方案 6,改造护栏最终的总高度为 130 cm,如图 6(b)所示。

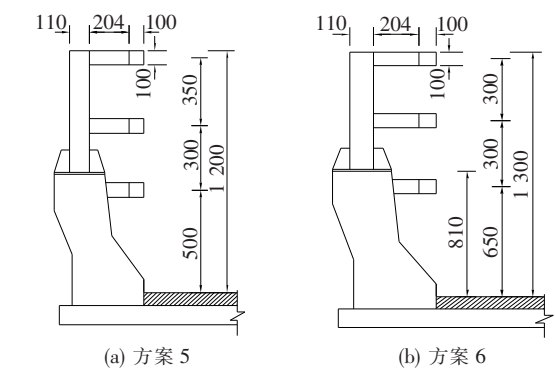


图6 组合式护栏方案(单位:mm)

5、6 护栏分别进行了小型客车、大型客车、大型货车的仿真碰撞试验,仿真分析结果见表 7。

根据仿真碰撞试验结果,方案 5、6 均能有效防护小型客车、大型客车、大型货车碰撞作用,桥面板及主梁均未开裂,总体防护性能达到六级(SS 级)要求。因此,采用方案 5 的设计理念,能够解决混凝土护栏高度为 63.5~81 cm 的大翼缘桥面板护栏的改造问题,满足经济适用的预期目标。

5 工程应用

该文推荐组合式护栏改造方案已在 6 座特大桥、

按照文献[5]中对试验碰撞条件的规定,针对方案

表 7 仿真分析结果(方案 5、6)

碰撞车辆		方案 5	方案 6
小型客车	车辆顺利导出,护栏、桥面板及主梁未破坏		车辆顺利导出,护栏、桥面板及主梁未破坏
大型客车	车辆顺利导出,护栏的最大横向动态变形量为 35 cm,护栏、桥面板及主梁未破坏		车辆顺利导出,护栏的最大横向动态变形量为 38 cm,护栏、桥面板及主梁未破坏
大型货车	护栏一定程度破坏,车辆顺利导出,护栏的最大横向动态变形量为 37 cm,桥面板及主梁未开裂		护栏一定程度破坏,车辆顺利导出,护栏的最大横向动态变形量为 35 cm,桥面板及主梁未开裂

大桥的护栏改造项目中实践应用,合计单侧长度超过 15 000 m。实践表明该方案经济效益显著,平均节约造价 400~500 元/m;可充分利用原护栏,施工方便且安全性高。

6 结语

利用有限元仿真分析方法对 6 种护栏提升改造方案逐一进行了分析和优化,有效解决了碰撞荷载导致桥面板及主梁破坏的问题,最终确定了一种安全、适用、经济的 SS 级组合式护栏方案。

依托护栏提升改造工程,将该方案应用于实际工程,实践表明该方案施工方便、经济效益显著,具有较高的推广应用价值。

参考文献:

[1] 石红星,白书锋,吕伟民.车—混凝土护栏碰撞基本原理与冲击力计算[J].华东公路,2001(6).

[2] 贾宁,闫书明,马亮,等.组合式消能减速护栏实车碰撞试验研究[J].振动与冲击,2013(13).

[3] 韩海峰,皮振新,李新伟.新型梁柱式钢护栏研发与防撞性能试验研究[J].中外公路,2016(5).

[4] 符秋生.桥梁中分带 SAm 级混凝土护栏结构优化[J].城市道路与防洪,2016(5).

[5] JTG B05—01 公路护栏安全性能评价标准[S].

[6] JTG D81—2017 公路交通安全设施设计规范[S].

[7] 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(4).

[8] 邵永刚.组合式桥梁护栏防撞性能仿真与试验[J].交通运输工程学报,2010(1).

[9] 贾宁,王成虎,李勇.护栏结构安全裕度研究[J].公路工程,2017(5).

[10] 侯德藻,袁玉波,杨曼娟,李勇.在用桥梁护栏安全性能改进方法研究[J].公路交通科技,2010(5).

[11] 陈晖,姜超,丁旭东,王成虎.波形梁钢护栏升级改造技术研究[J].中外公路,2016(4).

[12] 孙全胜,宋金良,余海燕.超车辆撞击人行天桥的破损特征分析[J].中外公路,2016(8).