

钢管式桥梁栏杆结构性能及设计参数研究

徐 丹,林建茂

(福建省交通科研院有限公司,福建 福州 350004)

摘要:以钢管式桥梁栏杆结构为研究对象,采用现场加载试验与有限元分析法相结合方式,探讨传统的钢管式栏杆结构是否满足《城市桥梁设计规范》强制性修订条文设计性能要求;在此基础上进一步分析了立柱间距 L 、立柱与扶手构件厚度 D 、栏杆高度 H 3个主要设计参数变化对结构性能的影响规律。结果表明:传统的钢管式桥梁栏杆结构满足规范条文要求,安全储备系数较高;当立柱间距 L 大于2 200 mm时扶手水平变形率会急剧增大,且栏杆的抗侧移能力与立柱和扶手构件厚度参数呈正相关性而与栏杆高度参数呈负相关性。

关键词:钢管式栏杆;结构性能;设计参数;试验;有限元分析

中图分类号:TU398.9

文献标志码:A

文章编号:1671-5322(2020)03-0057-05

栏杆作为路、桥等交通附属设施,虽不是结构的主要承重构件,但在保障行人安全通行方面具有举足轻重地位。近年来因栏杆质量缺陷导致的安全事故层出不穷,也引起了相关部门的重视,如交通运输部相继发布了《提升公路桥梁安全防护能力专项行动技术指南》等一系列文件。已有学者陆续开展了栏杆结构的受力性能研究,并取得了一定成果。如文献[1-2]在归纳总结了国内外相关规范对栏杆结构要求的基础上,建议栏杆设计变形上限值宜为 $(1/100)$,并对GFRP栏杆结构性能进行探讨,结果表明该新型栏杆结构具有良好的安全性与经济效益;文献[3]研制了一种GFRP栅栏型宝瓶式新型栏杆结构,并通过现场加载试验与有限元数值相结合法探究了该类栏杆结构的性能,结果表明GFRP栏杆结构性能优越,具有推广价值;文献[4-5]从FRP结构形式、力学性能以及工程应用等方面进行分析,研究表明FRP栏杆结构具有形式简单、超载安全性能良好、施工机械化程度高等优势,具有广阔的应用前景。

综上所述,目前关于桥梁栏杆结构的力学性能研究主要集中在GFRP新型复合栏杆结构方面,而关于实际工程中应用最为广泛的钢管式桥梁栏杆结构安全性能及设计参数变化影响规律研

究鲜为报道。本文以福州市钢管式桥梁栏杆为该栏杆代表,探讨此类栏杆的结构力学性能及主要设计参数变化对其性能的影响规律。

1 栏杆结构

1.1 栏杆分类

常见的桥梁栏杆按材料组成可分为钢、铸铁、不锈钢、铝合金、石材、混凝土等多种形式。不锈钢或铝合金材质栏杆轻盈、美观,但价格较为昂贵,主要应用于景区、园林景观等领域;混凝土或石材栏杆虽然后期养护费用低,但结构自重大、造型单一、不美观等特征,主要应用于农村公路桥梁;钢材、铸铁材质栏杆虽然易锈蚀,但具有安装便捷、自重轻、价格低等特点,应用广泛。

按照栏杆构件截面形状的不同可分为圆形、矩形等多种形式。目前钢管式圆形截面栏杆结构类型是众多城市桥梁栏杆中较为常见的造型之一。

1.2 栏杆构造要求

常规的钢管式桥梁栏杆结构是由立柱、扶手、横杆、竖杆等杆件组成。各个部件通过焊缝焊接,立柱底板与底座通过锚筋、地脚螺栓等方式与桥面形成一体,保证结构不发生较大的挠曲变形,

还应满足构件最大竖直净距不得大于 110 mm,高度不小于 1 100 mm(非机动车道 1 400 mm)的要求^[6]。

1.3 工程依托

随机抽取福州市仓山区某路段桥梁栏杆结构为试验对象,该类传统的钢管式桥梁栏杆结构每栏标准跨径 L 为 2 200 mm,立柱高度 H 为 1 100 mm,立柱与扶手截面尺寸均为 $\phi 102\text{ mm} \times 6\text{ mm}$,横杆和竖杆截面尺寸为 $\phi 32\text{ mm} \times 1\text{ mm}$,立柱底板与人行道板通过地脚螺栓方式连接。钢管式栏杆立面构造示意图 1。

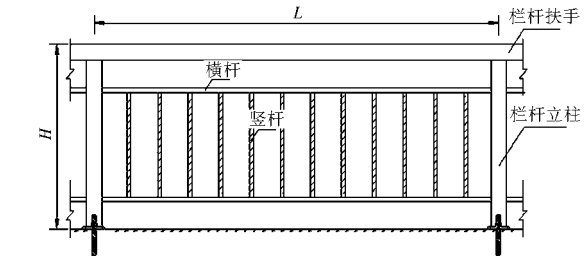


图 1 钢管式栏杆立面图
Fig 1 Elevation of steel tube railing

2 承载力评定

2.1 试验项目

目前关于桥梁栏杆承载力评定并没有一套较为完善的体系。参照《城市桥梁设计规范》^[6] 10.07 条强制性修订条文要求,分别对传统的钢管式栏杆进行 3 个不同荷载工况。工况 1:作用在栏杆扶手上的竖向荷载为 1.2 kN/m。工况 2:扶手水平荷载为 2.5 kN/m。工况 3:立柱柱顶推力为扶手水平荷载集度与柱间距的乘积(新增工况),且 3 种荷载工况分别计算,不得叠加。

2.2 有限元数值分析

运用 Midas Civil 有限元软件分别进行不同荷载工况的数值计算,立柱底部近似为固结方式模拟,栏杆材质弹性模量 E 取 198 GPa,泊松比 λ 值为 0.3。3 种不同工况下的数值计算模型见图 2~图 4。

考虑现场均布荷载不易实施,根据位移等效原则,分别在一联栏杆首端(尾端)栏中间扶手处施加 1.26 kN 的竖向力、第三栏(跨中栏)中间扶手处施加 8.12 kN 的水平推力。

2.3 试验加载

严格按照相关规范对栏杆试验进行加载,各

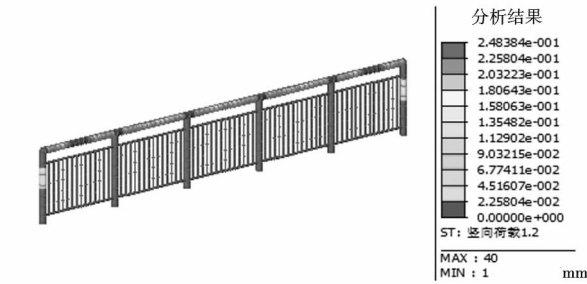


图 2 工况 1 荷载作用下栏杆位移图
Fig 2 Displacement diagram of railings under load condition 1

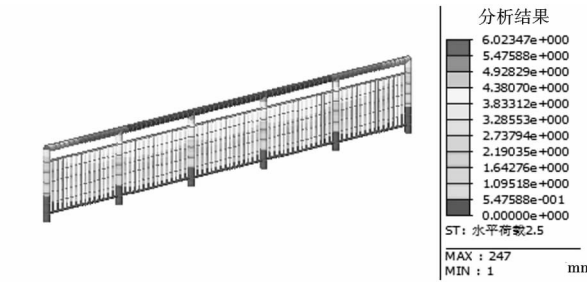


图 3 工况 2 荷载作用下栏杆位移图
Fig 3 Displacement diagram of railings under load condition 2

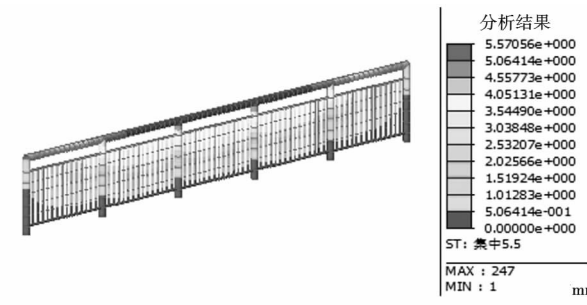


图 4 工况 3 荷载作用下栏杆位移图
Fig 4 Displacement diagram of railings under load condition 3

个工况均分为 5 级加载,分别按照最大荷载值的 20%、40%、60%、80%、100% 逐渐加载,每一级加载时间间隔均不低于规范要求,试验人员全程重点观测构件有无裂缝开裂、松动等异常现象,并做好逐级加载量测值。卸载后还要量测栏杆控制截面处的残余变形值,以便进一步判断材质工作状态。

2.4 试验结果分析与评定

在各个荷载工况下,栏杆控制截面处的位移实测值、理论值与残余值见表 1。3 个不同工况下各级加载实测值与有限元计算值对比详见图 5~图 6。

表 1 位移实测值与理论计算值

Table 1 Displacement measured value and theoretical value

mm

工况	测点位置	实测值	理论值	残余值
1	扶手跨中	0.22	0.25	0.01
2	扶手跨中	4.48	6.02	0.39
3	立柱柱顶	4.02	5.57	0.31

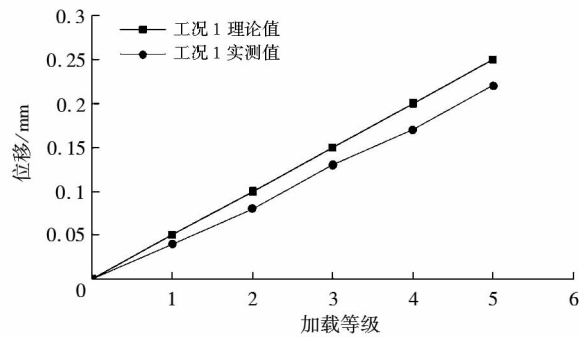


图 5 工况 1 实测值与理论值对比

Fig 5 Comparison between measured value and theoretical value of condition 1

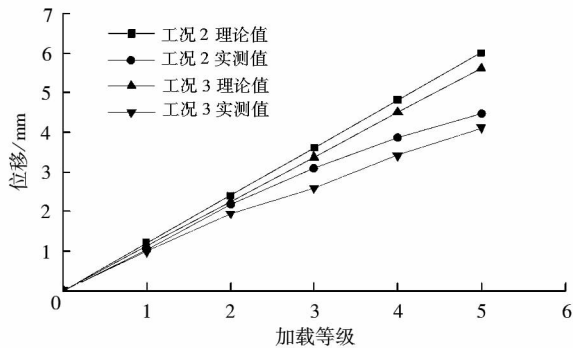


图 6 工况 2、3 实测值与理论值对比

Fig 6 Comparison between measured value and theoretical value of condition 2 and 3

由表 1 数据可知,3 种不同工况下栏杆的实测值均小于理论值,其中工况 1 荷载作用下截面的最大扰度变形量为 0.22 mm,仅为跨径的 1/10 000;工况 2、3 荷载作用下的变形量分别为 4.48 mm 和 4.02 mm,是扶手高度的 1/246、1/274,满足《城市桥梁检测与评定技术规范》^[7]要求的 1/120,说明该类型栏杆结构刚度较大,满足现行的相关规范承载力要求。另一方面从 3 个不同工况下的残余变形值(分别为 4.5%、8.7%、7.7%,均小于 20%),进一步说明钢管式桥梁栏杆结构在设计荷载作用下始终处于弹性工作状态,具有较高的储备系数值。

由工况 2、工况 3 理论与实测值可以看出,对于传统的钢管式桥梁栏杆结构在工况 2 荷载作用下的位移值大于工况 3,其主要是因为钢管式栏杆立柱构件抗弯曲能力大,另一方面立柱底板通过地脚螺栓锚固方式连接使得立柱具有较大的抗侧移刚度。不难发现对于立柱构件刚度大、底座连接(锚固、地脚螺栓方式)牢固的栏杆结构受文献[6]修订条文影响小,可满足正常使用功能。

3 栏杆构造设计参数分析

目前相关规范仅对栏杆构件间的横、竖净距构造要求,但对影响栏杆结构使用功能的立柱间距 L 、立柱与扶手厚度 D 、栏杆高度 H 等重要参数并没有具体的构造要求。本节在原栏杆设计参数模型的基础上,进一步探究这 3 个主要参数变化对栏杆抗侧向承载力的影响规律(工况 1 荷载影响非常小,可暂不考虑)。

3.1 立柱间距

立柱间距 L 是指标准一栏栏杆左右侧立柱间的中心距离。从结构力学角度分析,当 L 值越大,单根立柱分摊的荷载也就越大,越不利于保证结构正常使用。但从经济方面考虑, L 值越大越有利于提高安装效率与降低材料成本。为了深入分析 L 参数变化对结构的侧向承载力影响规律,在原有结构 L_0 为 2 200 mm 的基础上,分别构造 L_i 为 1 600 mm、1 900 mm、2 200 mm、2 500 mm、2 800 mm 5 个模型。在工况 2、3 荷载作用下,不同 L 值的栏杆模型理论位移值及用钢量(按长度 100 m 为单位)详见表 2。

表 2 不同立柱间距参数下载面位移值及用钢量

Table 2 Displacement value and steel consumption of section under different column spacing parameters

L_i /mm	扶手跨中/mm	立柱柱顶/mm	用钢量/t
1 600	4.74	4.35	7.97
1 900	5.09	4.83	7.86
2 200	6.02	5.57	7.79
2 500	13.90	6.40	7.74
2 800	22.90	7.18	7.66

由表 2 可知:立柱间距参数 L 是影响工况 2 荷载效应的敏感参数之一。总体上,随着 L_i 的增大,扶手跨中截面、立柱柱顶位移量呈逐渐增大变化趋势,而用钢量则逐渐减小。当 L_i 从 1 600 mm 增大到 2 200 mm 时,工况 2 与工况 3 荷载作用下

对应的截面位移值分别增大了 27%、28%,用钢量减少了 2.2%;而当 L_i 从 2 200 mm 增大到 2 800 mm 时,对应荷载工况下的截面的位移量分别增大了 280%、29%,用钢量减少了 1.7%。

其主要是因为工况 2 为均布荷载形式,控制截面处的位移量与 L_i 值呈二次方函数关系。因此,当 L_i 大于一定值时,其位移量会急剧增大。建议钢管式栏杆结构的立柱间距值在 1 600 ~ 2 200 mm 范围内较为合理。

3.2 立柱与扶手构件厚度

钢管式桥梁栏杆结构的抗侧移刚度主要由立柱与扶手构件承担。在构件直径不变的情况下,可通过增大立柱与扶手构件壁厚值 D 从而提高构件抗侧刚度。因此,有必要探讨 D_i 参数变化对结构的水平变形影响规律。分别构造 D_i 为 3.0 mm、4.5 mm、6.0 mm、7.5 mm、9.0 mm 的 5 个模型。在工况 2 和工况 3 荷载作用下,不同 D_i 值参数下的位移值及用钢量见表 3。

表 3 不同立柱与扶手厚度参数下载面位移值及用钢量
Table 3 Displacement value and steel consumption of section under different thickness parameters of column and handrail

D_i /mm	扶手跨中/mm	立柱柱顶/mm	用钢量/t
3.0	10.97	10.23	6.64
4.5	7.67	7.18	7.21
6.0	6.02	5.57	7.79
7.5	5.04	4.71	8.36
9.0	4.39	4.10	8.93

由表 3 可知:扶手跨中截面与立柱柱顶处的位移值受 D_i 参数变化影响规律基本一致,近似呈两阶段变化规律,而用钢量呈线性变化。当 D_i 从 3.0 mm 增大到 6.0 mm 时,扶手跨中、立柱柱顶截面处的位移量分别减小了 45.1%、45.6%,用钢量增加了 17.3%;而当 D_i 从 6.0 mm 增大到 9.0 mm 时,对应截面的位移值减小幅度为 27.1%、26.4%,用钢量增加了 14.7%。

分析其原因是因为栏杆结构的抗弯刚度与立柱与扶手构件截面惯性矩息息相关。在构件直径不变情况下,随着 D_i 的增大,截面惯性矩呈四次方变化。综合考虑 D_i 值在 6.0 mm 左右较为合理,偏小值时结构安全性较低,偏大值时经济性较低。

3.3 栏杆高度

栏杆高度是指人行道表面至栏杆扶手顶部的

距离,栏杆高度参数也是影响结构承载力的重要参数之一。在栏杆结构满足刚度与稳定性的前提下, H_i 越小, L_i 可做得更大,总体经济效益就更为显著。因此,在保证 H 满足规范要求的情况下,有必要探讨 H 变化对结构的性能影响规律。分别构造 H_i 值为 1 100 mm、1 200 mm、1 300 mm、1 400 mm 和 1 500 mm 的 5 个模型。在不同 H_i 值下,对应截面的理论位移值及用钢量见表 4。

表 4 不同栏杆高度参数下载面位移值及用钢量
Table 4 Displacement value of section and steel consumption under different railing height parameters

H_i /mm	扶手跨中/mm	立柱柱顶/mm	用钢量/t
1 100	6.02	5.57	7.79
1 200	7.68	7.28	8.36
1 300	9.64	9.21	8.93
1 400	11.91	11.63	9.50
1 500	14.51	14.01	10.07

由表 4 可知:随着 H_i 的增大,对应工况荷载下的截面位移值和用钢量呈线性增大变化趋势。当 $H_i < 1 400$ mm 时,工况 2 和 3 对应的位移变形率小于 1/120;当 $H_i \geq 1 400$ mm 时,工况 2 的位移变形率大于 1/120,不满足规范设计要求。

主要是因为栏杆为悬臂构件,其变形量与立柱底座截面处的弯矩值有关,当外力荷载作用在扶手或立柱顶部位置大小不变时,随着 H_i 的不断增大,其弯矩值也呈线性增大,因此会出现上述变化现象。综合分析,建议钢管式桥梁栏杆结构适用于栏杆高度在 1 100 ~ 1 300 mm 要求范围。

4 结论

本文应用现场试验与有限元数值分析法相结合,研究了钢管式桥梁栏杆结构的力学性能以及立柱间距 H 、立柱与扶手构件厚度 D 、栏杆高度 H 3 个设计参数变化对结构的抗侧向位移影响规律,得到以下几点结论:

(1)传统的钢管式桥梁栏杆结构安全性能良好,满足文献[6]中 10.07 强制性条文要求,可继续正常使用。

(2)立柱间距参数 L 是影响扶手跨中截面、立柱柱顶截面变形量的主要参数,当 L_i 大于 2 500 mm 时,扶手跨中截面水平变形率急剧增大,因此建议 L_i 值在 1 600 ~ 2 200 mm 范围内较为合理。

(3)扶手跨中截面与立柱柱顶的变形率随着立柱与扶手构件厚度 D_i 值的增大而减小,但随着栏杆高度 H_i 值的增大而增大。建议 D_i 值在6.0 mm、 H_i 值在1 100~1 300 mm较为合理。

参考文献:

[1] 冯鹏,齐玉军,叶列平,等. GFRP 栏杆的受力性能及其结构安全性研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2010(6):48-54.
[2] 齐玉军,冯鹏,叶列平. 栏杆结构的受力性能及设计方法研究[J]. 工业建筑,2011,41(5):71-79.
[3] 巫祖烈,桂涛锋,张锡祥. 新型复合材料桥梁人行道栏杆结构性能研究[J]. 山东交通学院学报,2012,20(4):62-66.
[4] 崔学常,张锡祥,巫祖烈. FRP 桥梁人行道栏杆工程应用效果研究[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2016,35(3):22-26, 46.
[5] 张锡祥,巫祖烈,杨忠,等. 高耐久性 FRP 桥梁结构、构件的研究与实践[J]. 重庆交通大学学报(自然科学版),2011,30(S2):1224-1232.
[6] 上海市市政工程设计研究总院. 城市桥梁设计规范:CJJ 11—2011[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2019.
[7] 中国建筑科学研究院,广东省建筑科学研究院. 城市桥梁检测与评定技术规范:CJJ/T 233—2015[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2015.

Research on Structural Performance and Design Parameters of Steel Tube Bridge Railing

XU Dan, LIN Jianmao
(Fujian Provincial Transportation Research Insititute Co. Ltd., Fuzhou Fujian 350004, China)

Abstract: Taking steel tubular bridge balustrading structure as the research object, this paper discusses whether the traditional steel tubular balustrading structure can meet the design performance requirements of compulsory amendment clause 10.0.7 in 2019 Edition of Urban Bridge Design Code (CJJ 11—2011) by combining field loading test and finite element analysis method. On this basis, the influence law of the three main design parameters on the structural performance was further analyzed, including column spacing L, column and handrail thickness D, and railing height H. The results show that the traditional steel tube bridge railing structure meets the requirements of the code, and the safety reserve coefficient is high. When the column spacing L is greater than 2 200 mm, the horizontal deformation rate of the handrail will increase rapidly, and the lateral displacement resistance of the railing is positively correlated with the thickness parameters of the column and handrail components, but negatively correlated with the height parameters of the railing.

Keywords: steel tube railing; structural performance; design specification; test; finite element analysis

(责任编辑:张英健)