

轻型钢桁架步行桥静力分析

张仰镛¹, 李 静^{1*}, 黄有露¹, 张 超¹, 朱竞翔²

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510640)

(2. 香港中文大学建筑学院, 香港 999077)

摘要: 本文研究结果基于一种新型轻型钢桁架步行桥, 该步行桥主体结构由冷弯 C 型卷边型钢通过高强螺栓连接组成。针对该步行桥在力学性能上研究不足的问题, 取一个单元的足尺试件进行静力荷载试验并利用 PKPM 建立模型进行分析, 研究桥体在竖向荷载下强度和刚度是否满足要求, 提出结构优化建议, 同时为相关的轻型钢结构和类似的桥梁结构设计提供借鉴和参考。

关键词: 轻型钢; 桁架结构; 步行桥; 螺栓连接; 静力分析

Static Analysis of Lightweight Steel Truss Pedestrian Bridge

ZHANG Yang-yong¹, LI Jing^{1*}, HUANG You-lu¹, ZHANG Chao¹, ZHU Jing-xiang²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, South China University of Technology, Guangzhou 510640)

(2. School of Architecture, Chinese University of Hong Kong, Hong Kong 999077)

Abstract: The results of this paper are aimed at a new kind of lightweight steel truss foot-bridge. The main structure of the pedestrian bridge consists of the cold-formed C-beam steels connected by high-strength bolts. To supplement the lacking results on mechanical properties of pedestrian bridges, a full-scale test specimen from one unit is used to static load test and its PKPM model is established to study whether the strength and stiffness of the bridge under vertical load meet the requirements. Based on the experimental and numerical results, recommendations of the structural optimization are proposed in this paper, which can provide reference to relevant light steel structures and similar bridge structures.

Key words: lightweight steel; truss structure; pedestrian bridge; bolt connection; static analysis

0 引言

如今, 钢结构桥梁在城市建设中应用广泛, 除了用于建造城市大跨度公路、铁路桥梁外, 钢材也逐步用于建造城市中相对小型的过街天桥, 与此同时, 小型钢结构桥梁在城市公园中的应用也越来越广泛^[1]。在结构形式上, 钢桁架结构与钢箱梁结构相比具有承载能力高、刚度大、跨越能力好、行人舒适感强等特点, 且同样具有结构加工质量易于控制、施工吊装方便等优点^[2]。与城市大跨度桥梁使用的规整桁架相比, 小型钢结构桥梁中所用的桁架造型更为独特灵活^[1]。

鄱阳湖旅游景点观鸟栈道步行桥由香港中文大学朱竞翔教授团队设计(图 1), 其主体结构均采用冷弯 C 型卷边型钢, 构件之间均使用高强螺栓连接, 顺应了步行桥向结构轻巧、造型美观、

跨度较大以及应用新材料方向发展的趋势^[3]。



图 1 鄱阳湖旅游景点观鸟栈道步行桥工程图

该步行桥在旅游风景区和城市公园的景观桥建设中体现了结构美观、建造速度快等优越特点。由于轻型钢结构偏柔且目前该类步行桥的静力及动力性能研究较为欠缺, 现取该步行桥中的一个单元进行模拟人群荷载下的静载试验, 研究其相关静力性能, 检验轻型钢作为步行桥主体结构材料时桥梁的安全性和适用性, 并提供优化设计建议。

1 试验概况

1.1 试件

如图2, 本试验使用的足尺试件由步道平台、转换平台、支撑平台以及两边的桁架组成, 主体跨度(步道平台长度) 12.95 m, 总跨度 17.48 m。其中, 步道平台、转换平台和两边桁架均采用冷弯 C 型卷边型钢材料。对于步道平台, C 型卷边的存在使横梁与纵梁的翼缘存在一定间隙, 因此需要在实际施工过程中填充一个高强螺母, 保证二者的翼缘通过高强螺栓紧密连接; 转换平台以及两边桁架的连接方式与步道平台相同; 支撑平台由槽钢相互焊接组成, 通过高强螺栓将其纵梁与转换平台的横梁连接。各构件的尺寸见表1。

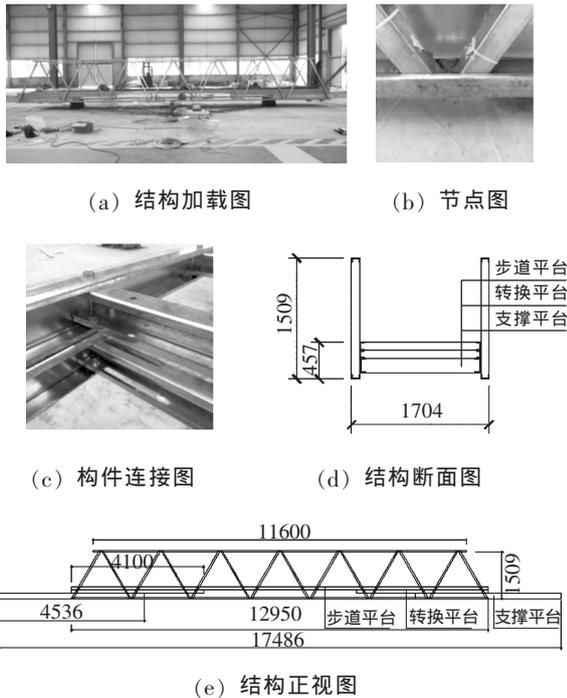


图2 结构示意图

表1 各构件钢材尺寸

构件	杆件名称	腹板高度×翼缘宽度×壁厚/mm	卷边尺寸/mm	杆长/mm
步道平台	横杆	75×50×2	15	1 500
	纵杆	100×50×2	15	12 950
转换平台	横杆	75×50×2	15	1 500
	纵杆	100×50×2	15	4 100
桁架	横杆	100×50×2	15	11 600
	斜腹杆	75×50×2	15	1 771
支撑平台	横杆	180×70×9	—	1 334
	纵杆	180×70×9	—	4 536

1.2 测点布置

依据结构设计计算结果, 跨中区域和支座区域的杆件应力最大, 因此应变测点主要针对该区域杆件进行布置。根据轻型钢结构易变形的特点, 推测该桥的挠度可能较大, 因此试验选取跨中位置布置位移测点。因该人行桥结构具有对称性, 因此测点亦对称分布。图3是该人行桥一侧桁架应变片和位移计布置图, 其中黑色色块代表应变片, 白色色块代表位移计, 数字代表应变片编号(括号内数字代表另一侧桁架相应位置的应变片编号)。

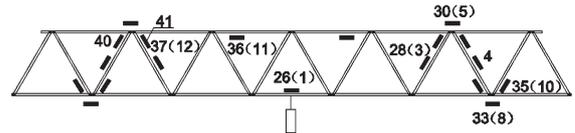


图3 人行桥挠度和应变测点布置图

1.3 加载方式

综合考虑加载安全和现场条件等因素, 试验时采用现场的四个硬木块作为结构的支座, 结构试验图如图4所示。试验采用水袋注水方式进行加载, 每个水袋加满水后平均质量为 1.2 t, 每级加载和卸载均使四个水袋同时进水和出水以保证结构受力均匀, 分为两级进行。正式加载前, 向四个水袋同时注水至最大荷载的 20%, 进行 5 min 的预加载, 使整个结构进入正常工作状态。表2是该人行桥分级加载和卸载控制表。



图4 试验加载现场图

表2 结构分级加载和卸载控制表

荷载等级	荷载/kN	加(卸)载比例/%	持续时间/min	静置时间/min
一级加载	23.4	50	10	30
二级加载	46.8	100	10	30
一级卸载	23.4	50	10	5
二级卸载	0	0	10	5

1.4 试验结果分析

CJJ 69-95《城市人行天桥与人行地道技术规范》^[4]中对梁、桁架等大跨结构人群荷载的规定与加载长度有关, 经该规范计算的人群荷载为

4.9 kN/m²，将试验荷载值换算成均布荷载值为 2.37 kN/m²，因此试验荷载值与设计荷载值的比值为 48.4%。本次试验实际使用四个支座，分别布置在支撑平台、步道平台的两端。通过将试验数据与软件分析数据对比分析发现，实际模型与简支梁模型分析结果相似，因此软件分析假定本次试验模型为简支梁模型，取步道平台两端支座作为实际支座。本次试验施加的荷载值较小，结构具有很大的安全储备，在整个加载过程中并未出现明显的挠度变形以及杆件的局部屈曲。试验结果如表 3 所示（应力以受拉为正，受压为负，下文均采用此规定）。

表 3 试验数据处理结果

荷载值	最大拉应力/MPa	最大压应力/MPa	跨中挠度/mm	挠度/跨度
试验荷载	32.55	-55.61	12.92	1/1 002
规范荷载	67.25	-114.90	26.69	1/485

通过对试验数据进行处理分析，可以得出以下两个结论：

(1) 在试验荷载下，杆件最大应力发生在上弦杆的跨中部位。推算到规范荷载设计值下，杆件的最大压应力为 114.9 MPa，约占 Q235 钢材抗压强度设计值 215 MPa 的 53.4%，即该步行桥的强度具有较大的安全储备。

(2) 在试验荷载下，该步行桥竖向最大挠度为 12.92 mm，推算到规范荷载设计值下为 26.69 mm，按照简支梁模型选取结构跨度，其挠度/跨度=26.69 mm/12 950 mm=1/485。考虑到在实际加载过程中，跨中一侧的位移计出现故障导致采集的数据中断，同时在结构试验的设计环节没有考虑支座的变形，这些因素均可能导致计算的变形存在误差。规范^[4]规定，天桥上部结构按人

群荷载计算的最大竖向挠度与跨径之比，桁架不应超过 1/800，结合软件对结构挠度的计算结果对实测挠度值进行修正，得出该步行桥的挠度接近规范的规定值。

1.5 应变分析

虽然试验计算结果表明该步行桥的强度具有很大的安全储备，但不能完全反映构件在加载过程中的受力状态变化。考虑到不同构件以及构件的不同部位受力情况不同，现分别对不同部位的构件作进一步分析。

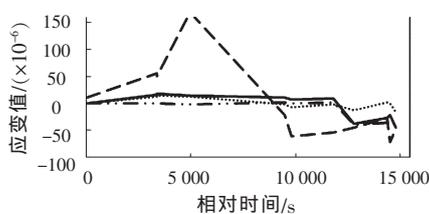
构件的所有节点均采用螺栓连接，在构件组装过程中部分杆件出现局部轻微变形，施加荷载后，节点区附近的斜腹杆以及节点之间的弦杆受力状态复杂，部分区域在整个加载过程中出现先受拉再受压的现象，如图 5 所示，因此节点在复合应力状态下的受力情况不能忽视。

主桁架上下弦杆的应变随荷载的增加呈线性增加，构件一直处于弹性状态，如图 6 (a)；大部分斜腹杆应变随荷载的增加呈线性增加，但 4 号应变片数据非线性变化，应变值较小且应变曲线没有明显的突变点和屈服平台，如图 6 (b)，说明构件在试验荷载下由于存在初始变形而产生的内力重分布现象，对构件受力会产生一定的影响。

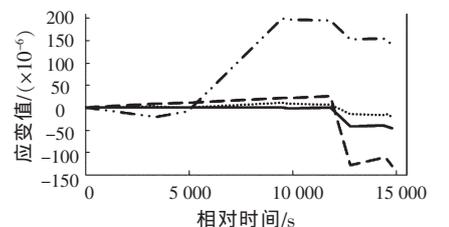
2 软件分析

2.1 软件建模

该人行桥结构布置对称，在人行荷载下两边桁架为主要受力构件，同时考虑到计算的简便性，采用 PKPM 软件建立平面桁架结构模型如图 7 所示，模型计算尺寸与图 2 所示桥体结构一致。构件截面根据实体结构的截面设置，材料的弹性模量为 206×10^3 N/mm²，屈服强度为 215 MPa。在桁



(a) 节点附近斜腹杆



(b) 节点之间弦杆

图 5 节点附近应变曲线

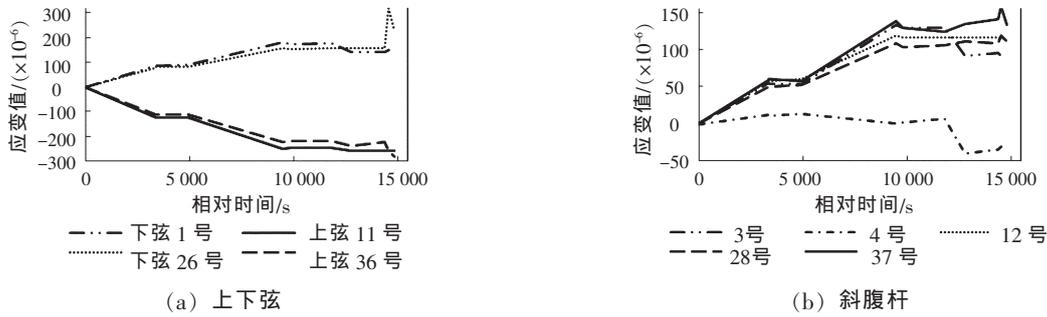


图6 杆件中部应变曲线

架下弦的两侧按照试验时相应的支座位置设置两个固定铰约束，释放一端水平位移，使其更接近于试验模型。

计算时将人群荷载简化为集中力，施加在步道平台与斜腹杆的节点上。本次结构分析不考虑风荷载作用。从结构简化角度考虑，将主桁架节点处杆件连接方式设置为铰接，计算只考虑杆件的轴向变形，此时模型只考虑平面内计算。为了保证软件计算结果的准确性，同时利用结构力学求解器对该人行桥建模，模型建立方式与PKPM相同，最后将二者计算结果进行对比分析。

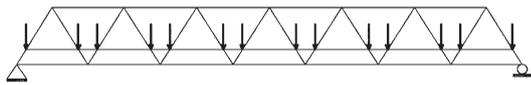


图7 鄱阳湖步行桥软件分析模型

2.2 静力分析

表4是两个软件模型计算结果对比。可以看出，经过模型的反复校正后，在试验荷载下PKPM与结构力学求解器的计算结果基本一致，说明软件模型具有一定的可信度。

表4 软件分析结果对比

软件	跨中上弦杆/MPa	跨中下弦杆/MPa	受力最大腹杆/MPa	挠度/mm
PKPM	-52.39	40.65	30.00	6.0
力学求解器	-53.97	41.59	30.39	7.7

在试验荷载下，构件轴向平均最大应力为53.18 MPa，推算到规范荷载下为106.09 MPa，远小于材料的屈服强度215 MPa，即设计荷载作用下，结构构件均处于弹性状态，构件强度满足设计要求。

天桥上部结构要求^[4]按人群荷载计算得到的最大竖向挠度与跨径之比，桁架不应超过1/800。该步行桥在试验荷载下结构竖向最大挠度取PKPM计算结果为6.0 mm，推算到规范设计荷载下为12.0 mm，约为桥体跨度的1/1080，即桥体竖向挠度满足设计要求。

2.3 计算模型优化

该步行桥在试验前组装时发现两边桁架存在平面外轻微晃动的可能性，横向刚度不足，因而上弦杆在受压时可能发生平面外失稳。从结构设计角度考虑，将原模型中的支座移动到跨中使原结构由简支梁模型变成悬臂梁模型，利用PKPM对其建模分析，在试验荷载下计算结果与原模型作对比，如表5所示。

表5 应力挠度计算结果

模型	跨中上弦杆/MPa	跨中下弦杆/MPa	受力最大腹杆/MPa	结构挠度/mm
简支梁	-52.39	40.65	30.00	6.0
悬臂梁	40.43	-48.26	29.76	4.5

可以看出，将结构模型由简支梁改为悬臂梁后，上弦杆由受压状态变为受拉状态，可以避免在水平荷载（行人推力）作用下发生平面外失稳现象；下弦杆虽由受拉状态变为受压状态，但由于不会直接受到行人推力以及隔撑和步道平台所提供的侧向支撑作用，构件的整体受压稳定性可以得到保证。同时，悬臂梁模型的结构竖向刚度增大使跨中挠度减小，保证结构的正常使用要求。

3 结论

(1) 传统的步行桥多为混凝土以及重型钢结构桥梁，结构笨重，安装难度较大；现今以铝合

金为代表的新型建筑材料已经逐渐推广到步行桥的建设中^[5]。本文步行桥使用了轻质高强的冷弯C型卷边型钢，构件全部采用高强螺栓连接，施工速度快，施工所需人数较少，尤其适合在运输、安装条件不佳的地区或有快速建造需求的情况下使用，同时结构的简洁、美观性也使其适用于旅游景区和城市公园的景点建筑中。

(2) 软件计算结果与静载试验结果吻合较好，说明将该步行桥的空间受力性能简化为主桁架平面模型后可信度较高。

(3) 各杆件在荷载作用下应变值均较小，构件强度满足要求，但在节点附近，构件的受力状态复杂，同时构件的初始变形对构件可能造成的内力重分布现象均需要引起注意。

(4) 该步行桥在静载作用下，应力及挠度实测值对称性良好，且在分级荷载工况下，应变及变形与荷载呈线性关系。

(5) 在预载工况下，挠度实测值较正式加载工况下的挠度实测值要大，说明预载能有效地使该步行桥各杆件间连接紧密，整个结构进入正常工作状态。

(6) 根据试验荷载下的应力实测数据推算出的规范荷载下杆件应力值可以看出，该步行桥的应力储备较高，设计较保守，而跨中挠度有待进一步研究确定是否满足规范规定的 $L/800$ 的要求。

(7) 将模型由原先的简支梁改为悬臂梁以后，结构的竖向变形减小，初步解决了上弦杆在缺乏侧向支撑的情况下易受压失稳的问题，使结构受力更加合理。

(8) 在结构设计中，桥梁承受的主要荷载为自重恒载及活载，而一般桥梁的恒载效应约占桥梁结构荷载总体效应的80%以上，故对于活载挠度的要求较严格。而对于整体质量较轻的轻钢步行桥，恒载所占比重较低（该轻钢步行桥恒载效应仅占整体效应的16.95%），人群活载占据了较大比重。设计中参考国内规范对于人群活载挠度 $L/800$ 的要求，使得该桥在满足强度要求的情况下，仍需要通过增加截面尺寸、减小跨度等方式提高整体刚度才能保证该桥满足活载挠度的要求。若在这个方面能参考德国工业标准DIN1052^[6]中对

人群荷载的挠度不大于 $L/300$ 的要求，就可以大大降低该桥建造成本^[7]。

综上所述，该步行桥的竖向荷载主要由两侧的桁架承受，由于缺乏足够的侧向支撑，平面外刚度小，在水平荷载作用下易失稳，可以通过改变结构受力模型、增加隅撑等方式提高结构的横向刚度，保证结构的平面外稳定。相比传统钢结构桥梁，挠度是该步行桥承载力主要控制因素，但随着人行天桥向大跨、轻型方向发展，由此引起的人行天桥的振动问题也日益突出，对大跨、柔性和轻型人行桥由行人引起的桥梁振动已经成为控制人行桥设计的主要因素^[8]，因此该步行桥的动力特性有待进一步研究。同时，对于轻型钢人行桥的设计和施工目前还缺乏相应的规范，因此在实际工程中需要谨慎应用。

参考文献

- [1] 霸超. 小型钢结构桥梁在城市公园中设计与应用研究 [D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- [2] 刘晓捷, 邵忠民, 乔宇. 钢桁架结构在人行天桥中的应用 [J]. 市政技术, 2012 (6): 37-41.
- [3] 薛佳. 城市步行桥空间研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006.
- [4] 北京市市政工程研究院. CJJ 69-95 城市人行天桥与人行地道技术规范 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1996.
- [5] 姚常华, 杨建国, 吴利权. 铝合金结构桥梁的应用现状、前景及发展建议 [J]. 钢结构, 2009 (7): 1-5.
- [6] IOKURA. Application of aluminum alloys to bridges and joining [J]. Technologies weld International, 2007 (10): 781-785.
- [7] 高敏, 蒋洪新. 某全铝合金人行桥静载试验分析 [J]. 低温建筑技术, 2010 (6): 82-83.
- [8] 孙道远. 某轻型柔性钢结构人行天桥的动力特性分析 [J]. 四川建筑科学研究, 2011, 37 (3): 60-64.