

人行索桥合理结构形式研究

马 蕾¹, 胡 隽², 何志勇³

(1. 武汉铁路桥梁技工学校, 湖北 武汉 430050; 2. 华中科技大学土木工程与力学学院, 湖北 武汉 430074; 3. 中铁十一局四公司, 湖北 武汉 430074)

摘 要: 为得到适合山区人行索桥的合理结构形式, 通过对目前大部分山区人行索桥安全隐患及事故的调查, 并对悬索桥和索道桥进行理论计算和对比分析, 提出索桁结构概念。索桁桥结构由上主缆、下桥面缆索及吊杆组成, 通过在空载下张拉下桥面索形成一个类似桁架结构的空间体系。通过对索桁桥、悬索桥、索道桥 3 种结构形式的对比分析可知, 在山区修建人行索桥采用索桁结构体系是比较合理的, 索桁桥可以降低活载挠度, 节省工程造价。

关键词: 人行索桥; 桥梁事故; 结构体系; 索桁桥

中图分类号: U448.11

文献标志码: A

文章编号: 1671-7767(2012)03-0050-04

1 前 言

我国广大农村人口散居在大山之中, 老百姓出行非常困难, 而修建永久性桥梁难度大、费用高, 因此在山区农村修建了大量简易的人行索桥。由于农村公路建设缺乏技术和资金, 目前在山区农村已修建的人行索桥大多是村民自建或县乡负责修建, 为节约建设成本往往是三无设计, 甚至没有设计图纸, 只是简单模仿凭经验修建, 造成相当一部分人行索桥结构体系、结构尺寸、材料选择不合理, 有些存在安全隐患, 有些又造成材料浪费, 达不到安全、适用、经济、耐久、美观的要求, 影响正常的生产和生活, 甚至对村民生命安全造成威胁。因此对现有行人索桥的结构形式进行调查, 并利用理论分析得出合理的人行索桥结构形式^[1~5], 为今后山区行人索桥的修建提供参考, 具有十分重要的意义。

2 人行索桥现状

2.1 结构类型

目前, 我国人行索桥按结构体系分主要有 2 类: 悬索桥和索道桥。

人行悬索桥主要结构包括主索、桥塔、桥面系和锚固体系 4 个部分, 必要时设置抗风索。这种桥梁主索悬挂在桥塔顶部并锚固于两岸的基础上。其受力特征是荷载由吊杆传给主索, 通过主索传给锚固系统, 传力系统简洁明确, 主要材料受拉, 材料利用效率高。

人行索道桥由最早的铁链桥演变而来, 是一种主要由稳定索、桥面索以及桥面板等组成悬索受拉

体系的桥梁结构形式。索道桥结构造价低、技术简单, 但是因为桥面向下挠曲, 而不能像悬索桥那样可以通过调整吊杆使得桥面系平顺。另外, 由于这种结构形式质量中心集中在桥面, 抗震性与稳定性较差; 较大跨度时, 由于矢跨比小, 主索拉力大, 导致主索和锚碇材料用量大。我国古代的索道桥基本上是这种结构类型。

2.2 事故及原因

国内、外人行索桥由于疏于管理, 年久失修, 一些桥梁、索道存在严重的安全隐患, 给人民群众生命财产安全构成了威胁。近年来, 人行索桥屡屡发生安全事故^[6] (见表 1)。

事故背后的原因也有很多方面: 没有正规的设计图纸; 没有合格的施工人员; 还有一些索桥“服役”时间过长, 地锚钢丝等固定设备遭到长期磨损且年久失修, 各个部件均已老化; 安全意识淡薄等。

2.3 实地调研

对 20 余座人行索桥进行调研^[6], 其中大部分为悬索桥, 索道桥仅有 1 座 (见表 2)。从现场调研可知: 现有大部分人行索桥的结构形式、结构尺寸、材料用量等不合理, 如: 主要结构安全系数不足, 造成结构安全隐患; 人行悬索桥刚度偏小, 在活载等激励下结构变形过大; 主索和吊索未设置索长调节器, 主索松弛引起桥面变形影响使用性能; 结构防腐设计不当, 造成人行悬索桥锈蚀严重, 缩短使用寿命; 护栏设计不完善, 甚至缺少必要的防护设施等。

针对目前人行索桥的特点, 本文提出改进型的空间索桁体系人行桥, 即通过上、下缆索及吊杆形成

表 1 人行索桥事故调查

桥名	类型	损毁时间	损毁原因
四川省洪雅县柳江镇铁索桥	索道桥	2010.02	共振
尼泊尔西部河谷吊桥	悬索桥	2007.12	超载
北京顺义区卧龙环岛悬索人行桥	悬索桥	2006.12	施工质量
万源市长坝乡清水溪村人行索桥	悬索桥	2006.06	超载
秘鲁南部阿亚库乔省科拉县吊桥	悬索桥	2009.04	超载
湖北兴山县铁索桥	悬索桥	2006.06	共振
北京朝阳区蟹岛度假村铁索桥	索道桥	2002.04	超载
湖南溆浦县两江乡铁索桥	索道桥	2003.11	超载
广东省广州市天湖景区铁索桥	悬索桥	1994.10	超载
陕西省周至县森林公园铁索桥	悬索桥	1991.02	超载
马来西亚霹雳州吊桥	悬索桥	2009.10	共振
甘肃岷县憩乐岛吊桥	悬索桥	1999.07	超载
重庆南岸吊桥	悬索桥	2007.12	超载
云南绥江县中城镇铁索桥	索道桥	2008.08	超载
珠海景区人行索桥	索道桥	2003.10	共振

表 2 现场调研人行索桥

桥名	桥址	跨度/m	类型
浙物索桥	青川县关庄镇	75	悬索桥
新华索桥	广元东河口地震遗址	92	悬索桥
康乐索桥	广元地震遗址	已损毁	悬索桥
鱼寨村索桥	青川县桥楼镇	45	悬索桥
大水村索桥	青川县青溪镇	58+18	悬索桥
堰平索桥	青川县青溪镇	52	悬索桥
阴平村索桥	青川县青溪镇	43	悬索桥
唐家河索桥	唐家河风景区	26	悬索桥
任家院桥	唐家河风景区	40	悬索桥
GTZ 项目桥	唐家河风景区	28+28	悬索桥
茶坝河桥	唐家河风景区	70	悬索桥
红旗索桥	广元板桥镇	112	悬索桥
广福沟吊桥	白老虎河	110	悬索桥
斑竹园索桥	旺苍县斑竹园镇	60	悬索桥
茨竹坝索桥	旺苍县茨竹坝镇	60	悬索桥
通福桥	广元	4×36	悬索桥
雪溪桥	广元朝天区	50	悬索桥
东溪乡索桥	广元	80	悬索桥
龙麒麟索桥	浙江文成县风景区	140+88+81	悬索桥
白鹤山庄索桥	温州泰顺	350	索道桥

空间体系的人行索桁桥,其结构示意图 1。

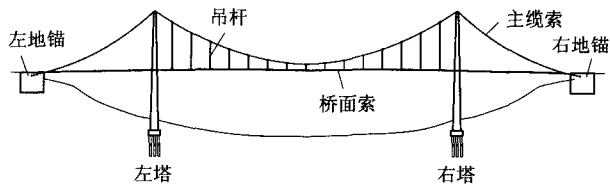


图 1 人行索桁桥结构示意图

3 理论计算分析

取主跨径为 75 m,分别对索桁桥、悬索桥、索道桥等进行分析,并从经济性和受力性能方面进行比较,选择最合理的桥型^[7~10]。

3.1 索桁桥

索桁桥是由上主缆、下桥面缆索及吊杆组成,通过在空载下张拉下桥面索从而形成一个类似桁架结构的体系。桥面系上拱的人行索桥,主索承担大部分的竖向荷载,并传递给桥墩,在空载成桥状态下,下缆索上拱承受一定的初始应力。

对索桁桥建模分析,估算在人群满载的情况下满足挠度 $\leq L/250$,应力 $\leq 1\ 570\text{ MPa}/3.5=448.6\text{ MPa}$ (考虑到无有效防腐措施,安全系数取为 3.5)条件所需的材料用量及价格。

参照《Short-Span Trail Bridge Standard》,选择活载并按标准桥面计算恒载作为建模荷载值,主索选择 4 ϕ 28 钢丝绳,桥面索选择 4 ϕ 20,索的用钢量约为 1 600 kg。主索恒载垂度选择 7.5 m,桥面索拱度取 1 m,主索在塔顶约束按照设置滑轮或滑槽,即滑动考虑进行建模计算,得到有限元模型相应的挠度结果见图 2。

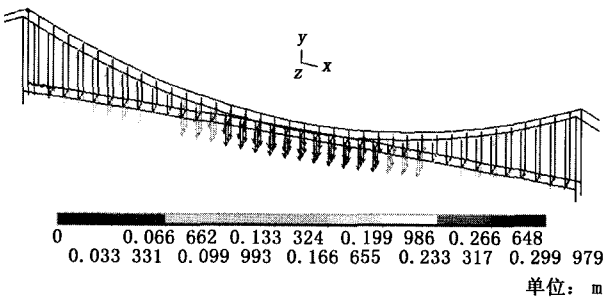


图 2 人行索桁桥有限元模型人群满载挠度

3.2 悬索桥

悬索桥指桥面索在成桥状态即下挠,竖向荷载由主索和桥面索共同承担的桥型。

假设成桥状态即只在恒载作用下,桥面索处于无应力状态,有活载时桥面索开始和主索一起共同承担活载的作用,取主索恒载垂度 7.5 m、桥面索成

桥下挠 0.8 m(线形为抛物线)、主索选择 4 ϕ 28 钢丝绳、桥面索选择 4 ϕ 20 进行计算,索的用钢量约为 1 600 kg。

有限元模型挠度计算结果见图 3,可以看出在用索量相同的情况下,其挠度与索桁桥相差不多,这是因为要保证挠度不至过大的条件下,桥面索实际下挠不能太大,因此其承担的竖向力也有限。

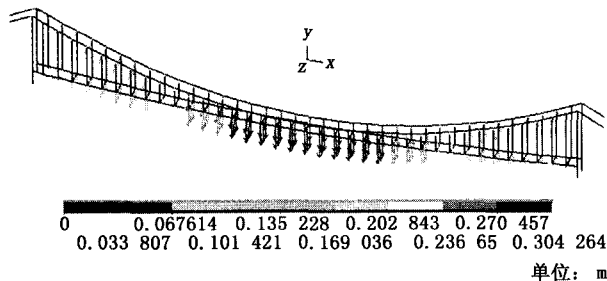


图 3 悬索桥有限元模型人群满载挠度

对比索桁桥和悬索桥,因索桁桥的主索和桥面索通过吊杆作用相互牵引,因此具有更好的整体性和更好的刚度,因此能更好地抵抗振动的作用。

3.3 索道桥

索道桥指无主索,桥面索承担所有竖向荷载的桥。对索道桥建模分析,估算满足在人群满载的情况下满足挠度 $\leq L/250$,应力 $\leq 1\,570\text{ MPa}/3.5 = 448.6\text{ MPa}$ (考虑到无有效防腐措施,安全系数取为 3.5)条件所需的用索量。取 $\phi 46$ 的钢丝绳进行计算,求取满足应力及挠度条件(验证发现 $L/250$ 的条件难以满足,故将挠度放宽至 $L/150$)所需的桥面索的最少根数。

经过计算发现,至少需要 19 根 $\phi 46$ 的钢丝绳作为桥面索,索的用钢量约 11 000 kg,且初始应力取到 419 MPa 才满足挠度条件,所得相应的挠度及应力见图 4。

3.4 对比分析

比较分析图 2~4 及计算结果可知,在跨度与荷载工况一致、挠度及材料应力满足相关规范的前提下,索桁桥与悬索桥主要材料用量相差不多;而索道桥虽然不用主索及吊杆等,但要达到相同的使用条件(即挠度、应力与前 2 种桥型相同时),其桥面索用量大幅增加,总造价相对较高,且施工时必须在桥面索中施加相对较大的初始应力,需要专用的张拉设备才能实现;柔性悬索桥虽然不用桥面索,但要达到相同的使用条件,其主索用量大幅增加,总造价相对较高,因此,对于山区人行索桥不建议使用索道桥及柔性悬索桥的结构形式。

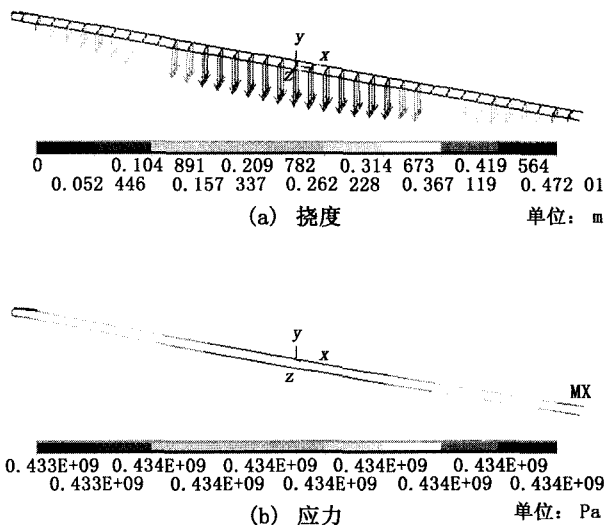


图 4 索道桥有限元模型人群满载挠度及应力

索桁桥与悬索桥虽然主要材料用量相差不多,但在相同的使用条件下,索桁桥的活载挠度小于悬索桥,且索桁桥的造价也稍小于悬索桥。其原因是索桁桥由于其桥面索因吊杆调节呈上拱线形,相当于施加了部分初始应力,改善了全桥结构的刚度特性。且主缆、吊杆和桥面索共同形成空间索桁受力结构,虽然其桥面索的应力稍大于悬索桥的桥面索应力,但由于桥面索使用钢丝绳等高强度材料,应力小幅增加(仍在规范的限值内),不仅可以增加全桥刚度,而且还能充分利用高强度材料的特性,以节省造价。因此,对于山区人行索桥建议使用索桁桥结构形式。

4 结 语

目前人行索桥主要有悬索桥和索道桥两类,因一些人行索桥建设时间较早,对振动和结构形式的认识还不足,甚至一些人行索桥采用了一些不尽合理的结构形式,这是导致事故频发的一个重要原因。根据对人行索桁桥、悬索桥和索道桥优缺点的分析比较可知,人行索桁桥是一种比较科学的结构体系,它是人行悬索桥的一种改进,根据理论计算分析,建议山区人行索桥尽可能采用索桁桥这种结构形式。

参 考 文 献:

- [1] International Labour Office, Guidelines for the Design and Construction of Suspension Footbridges [Z], Harare, 2000.
- [2] 赵长军. 大跨索桁桥初步设计研究(博士学位论文)[D]. 杭州:浙江大学, 2002.
- [3] 周云波, 黄贵德, 江鸿滨, 等. 山区公路悬索桥设计[J].

- 西部探矿工程,2004,(9):202—204.
- [4] Avery Louise Bang. Cable-Suspended Pedestrian Bridge Design for Rural Construction (Master Dissertation) [D]. Colorado: University of Colorado,2009.
- [5] Hu Jun, Liu Zhi-feng, Xu Wen-sheng. Application of Grey System Theory in Peace Avenue Overpass Bridge Construction Linear Control[C]// International Conference on Engineering Management and Service Sciences. Wuhan: 2009.
- [6] 浙江省交通规划设计研究院,浙江省温州市公路局学会,四川省广元市交通局. 人行索桥病害调查报告[R]. 2011.
- [7] 段炳俊. 渝东山区人行吊桥设计及其应用研究[J]. 山西建筑,2008,34(18):316—318.
- [8] 景天虎,李青宁. 悬索桥主缆成桥线形确定的有限元新算法[J]. 世界桥梁,2012,40(1):42—46.
- [9] 陈 策,吉 林. 基于模型试验的悬索桥主缆空气流动阻力计算[J]. 桥梁建设,2010,(6):40—43.
- [10] 胡 隽. 大跨度吊拉组合索桥的理论研究(博士学位论文)[D]. 北京:北方交通大学,2000.
- (编辑:穆卓辉)

Study of Rational Structure Form of Pedestrian Suspension Bridge

MA Lei¹, HU Juan², HE Zhi-yong³

(1. Wuhan Railway and Bridge Secondary School, Wuhan 430050, China; 2. School of Civil Engineering and Mechanics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 3. The 4th Engineering Co., Ltd., China Railway Shiyiju Engineering Group, Wuhan 430074, China)

Abstract: To get a rational structure form suited for mountainous pedestrian suspension bridge, according to the investigation into the potential safety hazards and accidents having occurred in a majority of existing mountainous pedestrian suspension bridges and based on the theoretical calculation and comparative analysis of suspension bridge and rope way bridge, the concept of cable-truss structure which consists of upper main cables, lower bridge deck cables and suspenders is proposed, a spatial system similar to truss structure will form via the tensioning of the lower deck cables in unloaded condition. It is found through the comparative analysis of three structural forms of cable-truss bridge, suspension bridge, and rope way bridge that building pedestrian suspension bridge of cable-truss structure system in mountainous region is rational, the deflection under the action of live load in such type of bridge is reduced, and the construction cost is also saved.

Key words: pedestrian suspension bridge; bridge accident; structural system; cable-truss bridge