

双层索面人行悬索桥状态反演研究

潘思彤¹, 夏 天², 夏宏达³, 夏汉生⁴

(1.中电建路桥集团有限公司,北京市 100048; 2.武汉城市公共基础设施运营发展有限公司,湖北 武汉 430000;
3.西南交通大学,四川 成都 610000; 4.武汉市工程建设执法稽查站,湖北 武汉 430015)

摘 要: 悬索桥的检测,由于吊杆力、索力难以直接测量,一般通过测量主缆的线形来确定悬索桥的状态。采用桥面索的人行悬索桥,存在两个承力索面,即塔顶索面和桥面索面。这两个索面和吊杆组成了索-吊杆超静定体系,其受力分析较为复杂。以某人行桥为工程背景,研究双索面人行悬索桥的内力反演问题,提出了一种根据实测线形反演索力的优化方法,与静载试验结果对比,说明了该方法的适用性。

关键词: 双索面悬索桥;索力反演;拟合悬链线

中图分类号: U448.25

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)10-0084-04

0 引 言

我国山区存在大量的人行悬索桥,这些桥梁对保障当地人员的生产生活发挥了重要作用。这些桥梁服役时间较长,可能存在安全隐患,大量人行悬索桥需进行检测和评估^[1-4]。人行悬索桥的研究主要集中在静力分析和抗风两个方面,其中静力分析是结构检测的基础。周君嵩、陈晟通过静动载试验和有限元建模计算分析相结合的方法,对浙江省一座人行悬索桥进行了检测及评估^[1]。贾恒介绍了双链双塔大跨度人行悬索桥的静荷载试验的内容和方法^[4]。康迎宾、杨雪等人研究了简易人行悬索桥的整体结构计算理论,不涉及大型桥梁分析软件,方法比较简单^[8]。除静力分析外,不少研究者还进行了人行悬索桥的抗风研究^[5-7]。

人行悬索桥的设计标准一般较低,设计资料常有遗失或不完整,给桥梁状态评定带来了很大困难。常规的单索面悬索桥对索来说是静定结构,只要吊杆力确定,则缆索的线形和内力可以根据静力平衡条件确知。人行悬索桥虽然规模比常规悬索桥小,但受力分析原理却更为复杂—存在两个承力索面,即塔顶索面和桥面索面,这两个索面和吊杆组成了索-吊杆超静定体系。本文以某人行桥为例,研究双索面人行悬索桥的内力反演和结构分析问题。通过几何约束和试验加载,验证了本文方法的可靠性。

1 工程概况

某深基坑工程位于上海软土地区。项目总用地面积约 2 万 m²。现场为空地。周边环境相对简单。

上部建筑物由高层写字楼及低层裙楼组成,其下均有四层地下室,基础埋深约 20 m。基坑开挖深度 20 m。采用地下连续墙围护,插入比 1:1,竖向采用四道钢筋混凝土支撑。

某人行桥为跨径 82 m 的悬索桥,桥面宽为 2 m(桥梁结构见图 1)。桥梁主缆采用 4 根 $\phi 40(6 \times 19+IFC-1670)$ 钢索,桥面索采用 6 根 $\phi 30(6 \times 19+IFC-1670)$ 钢索,抗风主索采用 $\phi 24(6 \times 19+IFC-1670)$ 钢索,吊杆采用 $\phi 20$ Q235 钢,共有 82 根吊杆,桥面板采用 240 cm $\times$ 24 cm $\times$ 6 cm 的木板。设计荷载为人群荷载 60 人 $\times$ 60 kg/人。

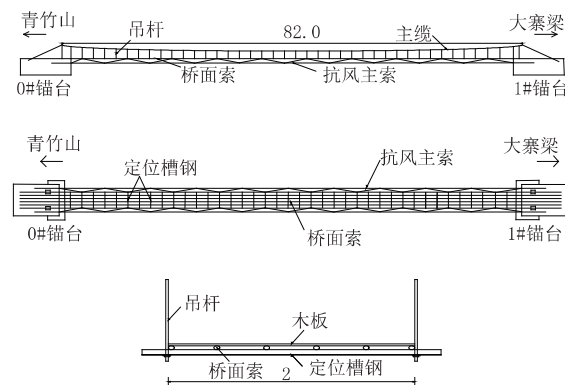


图 1 桥梁结构图

该桥已建成 10 年,出现了一些不对称变形,于 2018 年 7、8 月对桥进行了静载试验,检验桥梁结构承载能力是否满足设计荷载标准要求,评估桥梁结构

收稿日期: 2021-03-04

作者简介: 潘思彤(1985—),女,硕士,高级工程师,从事道路桥梁隧道科技创新科技项目与科研平台管理工作。

的工作性能。鉴于索力的直接测量难度较大,精度也难于保证,采用了实测桥梁结构线形的途径,反演结构在恒载、活载下的受力和变形,进而对桥梁承载状态进行评价。

2 基于实测线形的双索面索力反演

由于桥面索和主缆通过吊杆连接,同时承受荷载,构成了索系超静定结构,超静定的次数就是吊杆数。结构分析的关键在于根据成桥的主缆及桥面索线形和荷载情况,确定成桥状态下主缆和桥面索的索力以及吊杆力。本文研究发现,根据线形反演双索面悬索桥的受力,不再是单独的力学问题,而是优化问题。

首先通过自重下的线形,反演索力的成桥状态作为初始状态。然后建立有限元模型,计算设计活载下的桥梁内力和变形,与实测结果进行对比,验证测量结果的准确性。

2.1 主缆与桥面索索力的确定

主缆和桥面索的实测线形见图2,双层索面悬索桥的受力平衡见图3。钢索和桥面木板的重量变动很小,分析中按设计值取值。并将全桥自重视为均匀分布,认为恒载和活载等效为吊杆下端的竖向力 w 。沿虚线A-A'截取隔离体,主缆在吊杆上端点 oi 产生向上的力与桥面索在吊杆下端 di 产生向上的力之和为相邻吊杆间的荷载 w 。

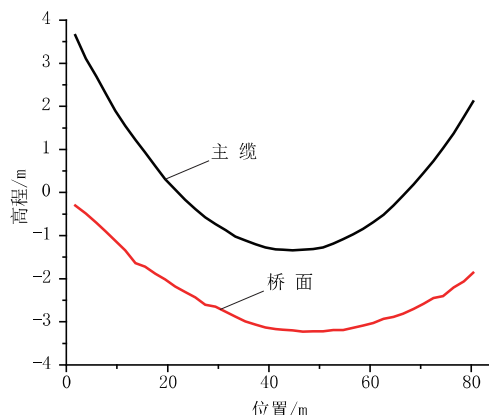


图2 实测主缆和桥面线形

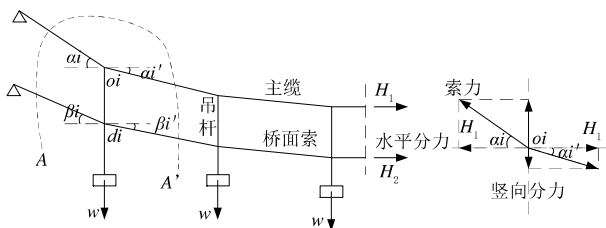


图3 索力计算

主缆在 oi 点产生的向上的力 $F_{1i}=H_1(\tan \alpha_i - \tan \alpha_i')$,同理桥面索在 di 点产生的向上的力 $F_{2i}=$

$H_2(\tan \beta_i - \tan \beta_i')$ 。上述假设索的重量较小,索的受力分析可以按节线法求解^[9]。图3中, H_1 为主缆的水平力; H_2 为桥面索的水平力; i 为吊杆号; w 为均布恒载作用在吊杆上的力。

对于每一个吊杆位置,都有 $F_{1i}+F_{2i}=w$,即:

$$H_1(\tan \alpha_i - \tan \alpha_i') + H_2(\tan \beta_i - \tan \beta_i') = w \quad (1)$$

$$\text{令 } \alpha_i = \tan \alpha_i - \tan \alpha_i',$$

$$b_i = \tan \beta_i - \tan \beta_i';$$

则式(1)变成

$$\alpha_i H_1 + b_i H_2 = w \quad (2)$$

式(2)左右两边都除以 b_i ,可得:

$$\frac{\alpha_i}{b_i} H_1 + H_2 = \frac{w}{b_i} \quad (3)$$

令 $\frac{\alpha_i}{b_i} = X_i, \frac{w}{b_i} = Y_i$;即得:

$$Y_i = H_1 X_i + H_2 \quad (4)$$

如果将 X_i, Y_i 分别作为直角坐标系中的纵坐标和横坐标,可以得到图4。通过线性回归分析,回归直线的斜率即为主缆的水平力 H_1 ,与 y 坐标轴的截距即为桥面索的水平力 H_2 。

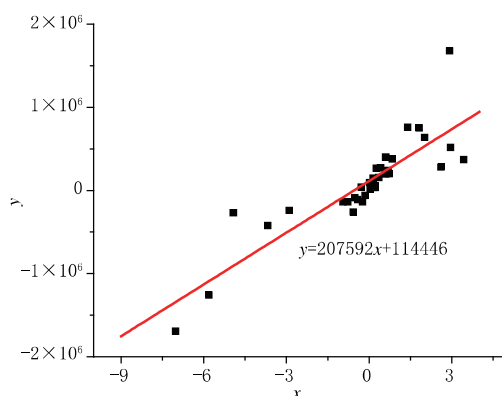


图4 双层索面索力回归分析

相邻吊杆间的恒载 $w=3.250$ kN。回归分析结果为: $H_1=207.592$ kN, $H_2=114.446$ kN。

2.2 主缆线形的拟合

不可避免地,实测线形有一定的测量误差,根据实测线形反演出的索力并不能令主索和桥面索在吊点处严格满足平衡条件。表现在图4中,实测点落在回归直线的两侧。为建立满足平衡条件的结构分析模型,须剔除实测数据的偶然误差。

假设主缆线形为悬链线,根据实测线数据拟合出主索的悬链线参数。以悬链线最低点作为坐标原点,不等高悬链线公式:

$$z = \frac{H}{q} \left[\cosh \left(\frac{q}{H} x - 1 \right) \right] \quad (5)$$

式中: H 为主缆的水平力; q 为均布荷载集度。

显然悬链线的线形取决于 H/q 和最低点的位置。悬链线拟合以最大差值最小为原则,即寻找一悬链线使之与拉索高程差别的最大值最小,即

$$\min\{\max[abs(z(x_i)-y_m(x_i))]\} \quad (6)$$

式中: x_i 为吊杆水平位置; y_m 为实测线形; z 为目标悬链线线形。

通过计算机程序对悬链线式(5)的参数 H/q 和最低点的位置进行搜索,得出最优 $H/q=182.14$ m。拟合后的悬链线最低点距第一根吊杆水平距离为 42.77 m。拟合线形与实测线形最大误差为 6.1 cm,见图 5。

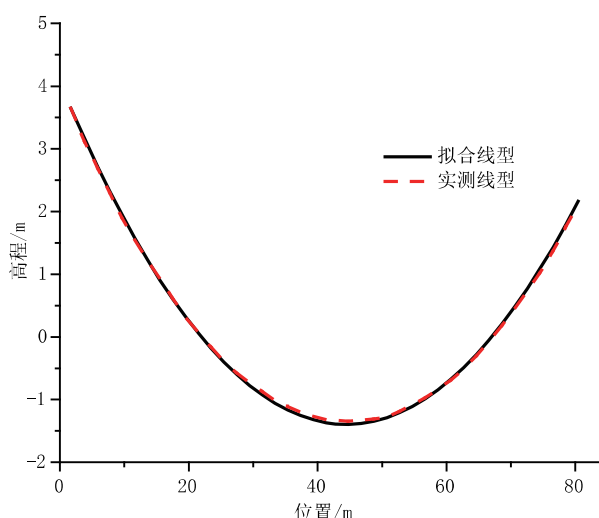


图5 主缆拟合悬链线

根据得到的拟合悬链线线形和回归分析得到的主缆水平力,采用节线法近似计算吊杆力。吊杆内力见图 6。显然大多数吊杆内力比较均匀,在靠近桥塔和跨中处吊杆内力较小,主要是因为靠近桥塔处桥塔承担了较多荷载,而跨中处吊杆间距仅有其他位置吊杆间距的一半。

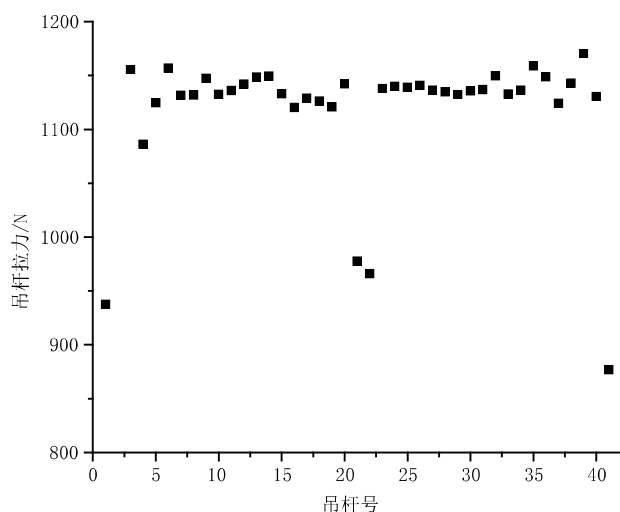


图6 成桥状态下吊杆内力

3 活载作用下结构行为

为分析桥梁在试验荷载下的内力和变形,根据上述拟合线形及索力建立成桥状态模型。根据拟合线形建立结构的 Midas 模型,主索、桥面索和吊杆都用索单元模拟。将主索水平力、桥面索水平力、吊杆拉力作为初张力输入各索单元,计入几何非线性。在吊杆下端点施加自重和试验荷载,进行非线性分析。试验荷载下的结构变形结果列于表 1,吊杆内力增量列于表 2。试验实测结构变形和吊杆内力增量也对照列于表 1 和表 2 中。理论计算结果与实测结果比较接近,说明了该分析方法的准确性。

表1 试验荷载下主缆、桥面变形

位置	吊杆号	桥面变形 /m		主缆变形 /m	
		理论计算	实测	理论计算	实测
1/4 跨	11	-0.031 1	-0.032	-0.031 1	-0.030
跨中	21	-0.040 4	-0.039	-0.040 4	-0.041
3/4 跨	31	-0.027 6	-0.025	-0.027 5	-0.027

表2 试验荷载下吊杆内力

位置	吊杆号	内力增量 /kN	
		理论计算	实测
1/8 跨	5	1.668	1.669
1/4 跨	11	1.494	1.490
3/8 跨	15	1.779	1.781
跨中	21	1.334	1.333
5/8 跨	26	1.466	1.463
3/4 跨	31	1.393	1.395
7/8 跨	37	2.008	2.010

4 分析结果验证

结果的校核是桥梁分析的重要环节,非线性分析的校核方法较少。本文用索力增量和索的伸长量闭合作为索结构的校核条件。

将施加试验荷载变形后的主缆线形视为悬链线。根据变形后主缆跨中下垂 4.077 cm,可以得悬链线参数 $H/q=205.944/1.139 7=180.70$ m;据此可确定变形后的悬链线线形。不等高悬链线的长度计算公式如下^[10]:

$$s=2\frac{H}{q}\sinh\left(\frac{ql}{2H}\right)\cosh\left[\operatorname{arcsinh}\frac{hq}{2H\sinh(ql/2H)}\right] \quad (7)$$

式中: s 为不等高悬链线长度; h 为不等高支承高差; l 为不等高支承间水平距离。

分别计算变形前后的悬链线长度,变形前为 82.866 2 m;变形后长度为 82.876 9 m。伸长 0.010 6 m。根据该伸长量计算主缆张力的增量应为 31.87 kN。实际 Midas 计算主缆张力增量为 31.44 kN。结果吻合良好,说明以该计算方式 Midas 软件计算结果是闭合的。

5 结 语

人行悬索桥虽然跨度不大,但结构体系较为特殊,主索和桥面索构成了两个索面的超静定结构。其结构分析既不同于单悬索,也不同于带加劲梁的常规悬索桥。本文以达州市江陵镇黄澄滩渡改人行桥为背景,提出了一种根据实测线形反演双层索面索力的优化方法。为剔除实测线形的误差,用悬链线拟合实测线形,以实测和拟合线形高差的最大误差最小作为拟合条件。将拟合线形、反演内力作为成桥状态,用有限元软件进行了活载作用下的内力和变形分析。并根据索力和挠度的闭合条件对非线性分析结果进行了校核。活载作用下的变形和受力结果与荷载试验测试结果符合良好,说明本文提出的索力反演、线性拟合和结果校核方法是可行的。本文提出

的分析方法,可用于类似双索面人行桥状态反演、承载力评价。

参考文献:

- [1] 周君嵩,陈晟.景区人行索桥的检测和评估[J].世界桥梁,2013,41(3):81-84.
- [2] 黄湘龙.耒阳市东洲公园人行悬索桥试验与加固设计研究[D].湖南长沙:中南大学,2014.
- [3] 黄学漾.景区人行索桥检测方法研究[J].福建交通科技,2017(3):71-75.
- [4] 贾恒.大跨度人行悬索桥静载试验技术研究[J].中国新技术新产品,2016(10):121-122.
- [5] 白桦,李德锋,李宇,等.人行悬索桥抗风性能改善措施研究[J].公路,2012(12):1-6.
- [6] 谢理文.大跨度人行悬索桥抗风稳定性研究[D].湖南长沙:湖南大学,2014.
- [7] 管青海.大跨加劲梁人行悬索桥风致稳定性研究[D].陕西西安:长安大学,2016.
- [8] 康迎宾,杨雪.简易人行悬索桥设计研究[J].河南水利与南水北调,2016(10):74-76.
- [9] 葛俊颖.桥梁工程软件 Midas Civil 使用指南[M].北京:人民交通出版社,2013.
- [10] 郭常瑞.悬链线与抛物线缆索计算理论对比分析[J].山西建筑,2012,38(3):173-176.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站:<http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱:cdq@smedi.com