

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2024.05.058

基于索力和振动特性监测的多跨空间异型刚梁柔拱组合桥梁安全韧性分析

高二朗^{1,2}, 崔鑫^{1,2}, 韩如林^{1,2}

(1.上海市建筑科学研究院有限公司,上海市 200032; 2.上海市工程结构安全重点实验室,上海市 200032)

摘要: 对多跨空间异型刚梁柔拱组合体系无推力拱桥进行有限元建模分析,基于振动法对吊杆索力进行检测,通过理论索力与实测索力的对比,分析该类复杂结构桥梁索力的受力规律。同时,基于历年桥梁索力检测结果,研究索力随外部荷载改变时的变化特征,对桥梁索力在长期运营状态下的健康状态进行安全韧性分析。通过测试桥梁的自振特性,分析桥梁结构整体性能,为评价桥梁工作状态提供依据。

关键词: 空间异型拱桥;刚梁柔拱;索力;自振特性

中图分类号: U441^{†.3}

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2024)05-0248-04

0 引言

随着时代的发展,中国桥梁技术快速进步,高等级公路及桥梁大规模建设,桥梁结构形式也越来越多样。一些新型复杂结构大跨径异型桥梁的建成使用,不仅满足了交通功能的需求,也成为了区域发展标志性建筑,与之相融合具有较高的视觉美感。同时这些桥梁结构的安全特性也受到普遍重视。

本篇所论述的桥型结构体系为中承式无推力异型钢拱桥,吊杆系统作为该类桥梁的主要传力构件,是把桥面系的恒载与活载传递到拱肋的关键受力构件^[1]。吊杆一旦出现问题,将会降低结构的使用性和耐久性,如果不加以重视,可能会导致结构出现安全隐患,甚至造成桥梁结构破坏。因此吊杆索力检测变得更为重要,通过索力测试判断吊杆目前的受力状况,从而分析结构内力和线形是否偏离设计状态,根据吊杆的索力情况为后续吊杆承载能力评定提供依据。

同时,桥梁结构的自振特性参数是表征结构整体工作性能的综合性指标,是桥梁结构动力分析的

重要依据,是判断桥梁动力特性的关键^[2]。通过对桥梁吊杆索力的检测与控制以及桥梁自振特性参数的采集,综合评估桥梁结构健康状态变得尤为重要。

1 工程概况

某多跨空间异型刚梁柔拱组合体系无推力拱桥(以下简称为“主桥”),分为南、北两幅,两幅桥平行布置,净距为 50.0 m,桥梁中心线法线与河道中心线顺交 58°。每幅主桥桥面总宽为 7.0 m(人行道)+3.5 m(非机动车道)+0.5 m(机非分隔带)+12.5 m(机动车道)+0.5 m(防撞护栏)+2.0 m(吊杆区)=26.0 m。全长 201.96 m,跨径组合为 8.28 m+45.9 m+76.5 m+58.14 m+11.34 m。

主桥主梁采用正交异性板流线型扁平等高单箱三室钢箱梁结构,梁宽 26.0 m,梁高 1.8 m;拱肋为外径 1.5 m、标准壁厚为 14.0 mm 的带肋中空圆形钢管结构,其中桥面以下部分为钢管混凝土组合结构;每幅主桥上共布置了 93 根吊杆,吊杆水平向间距为 3.06 m,每根吊杆均由 55 根直径为 5.0 mm、抗拉标准强度值为 1 670.0 MPa 高强度平行钢丝索组成;拱梁采用固结,固结节点可以传递弯矩、扭矩、竖向力和水平力;拱肋纵向水平力由钢箱梁平衡,拱肋横向水平力由 4 个中墩间各自布置的横向拱脚系杆平衡,每根系杆均由 85 根直径为 5.0 mm、抗拉标准强度值为 1 670.0 MPa 高强度平行钢丝索组成;每幅桥拱肋间布置 30 道风撑,间距为 3.06 m,风撑采用外径 0.75 m

收稿日期: 2023-04-25

基金项目: 上海市建筑科学研究院有限公司科技创新平台项目(KY10000038.20220021); 上海建科集团股份有限公司科研创新项目(KY10000038.20220052)

作者简介: 高二朗(1993—),男,本科,工程师,从事桥梁检测及桥梁健康监测工作。

通信作者: 崔鑫(1989—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁检测及桥梁健康监测工作。电子信箱: 804593822@qq.com

的中空圆形钢管结构。拱肋与主梁空间固结,形成组合结构,拱肋拱脚、中墩及边墩支点位置均采用盆式橡胶支座。主桥下部结构采用承台和钻孔灌注桩。主桥立面、平面布置示意图和箱梁横断面布置示意图如图1至图3所示,桥梁实景照片如图4至图5所示。

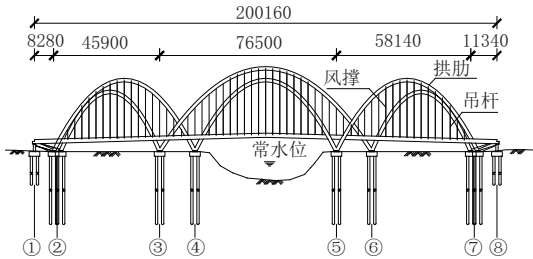


图1 主桥立面布置示意图(单位:mm)

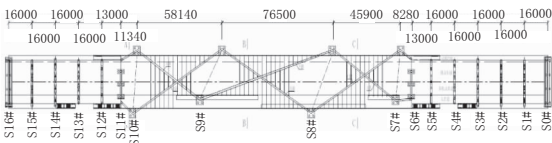


图2 主桥平面布置示意图(单位:mm)

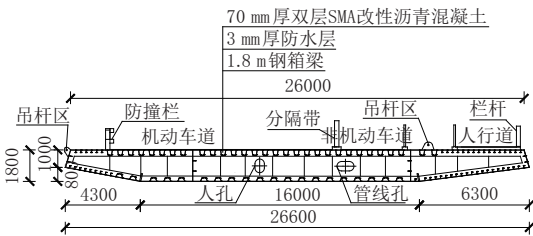


图3 主桥箱梁横断面布置示意图(单位:mm)



图4 主桥立面实景照片



图5 拱脚横向拉杆实景照片

2 基于有限元的桥梁理论分析

2.1 分析模型建立

利用 MIDAS Civil 对该中承式无推力异型钢拱桥进行有限元建模,主桥钢箱梁和拱肋采用空间梁单元,吊杆和系杆采用桁架单元,主桥共计有 241 个梁单元和 97 个桁架单元;在边界条件上,拱肋与主梁相交处采用固结,拱脚和钢箱梁梁端均采用支座约束。针对主桥结构的受力特点和变形特性,建立的有限元计算模型如图 6 所示。

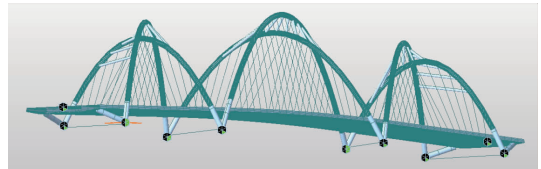


图6 主桥有限元计算模型图

2.2 恒载索力理论值分析

主桥总体施工按照先梁后拱的工艺进行,全部钢箱梁结构形成后,对拱肋结构进行卧拼竖转,最后进行吊杆索力的张拉。按照桥梁的施工工艺,在有限元模型中建立不同的施工阶段,并进行恒载索力分析计算出成桥吊杆索力。主桥成桥吊杆内力图如图 7 所示。

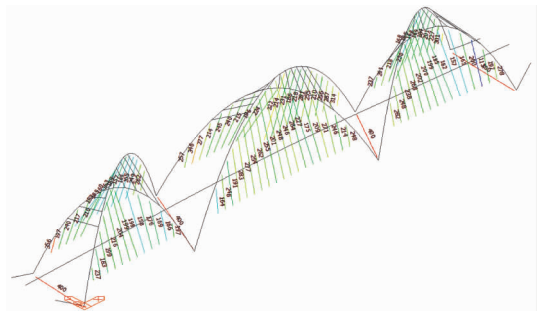


图7 主桥成桥吊杆内力图(单位:kN)

2.3 结构振动特性理论值分析

对于主桥振动特性检测,不但可以反应结构构件的损伤状况,还可以反应构件的整体特性以及受力体系的变化,能够分析桥梁结构特性,从而评估桥梁的工作状态。对于一些相对简单的桥梁结构来说,只需要检测结构的一阶次频率,而对于那些较特殊的结构动力分析而言,还应考虑二阶次、三阶次甚至更高阶次的频率。另外,对于桥梁结构基频还能够推算出承重结构的动刚度特性。主桥竖向前三阶理论阵型图如图 8 至图 10 所示。

3 吊杆索力现场测试与分析

3.1 现场测试方法

振动频率法是目前被采用范围最广且精度相对

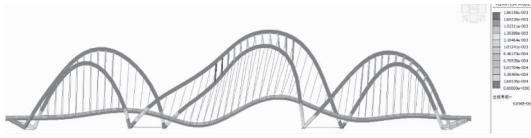


图 8 主桥钢箱梁竖向一阶理论阵型



图 9 主桥钢箱梁竖向二阶理论阵型

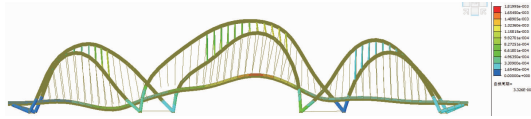


图 10 主桥钢箱梁竖向三阶理论阵型

较高的索力检测方法^[3],它基于环境随机振动作为结构物激振的振源来测定并分析结构物的振动特性进而求出吊杆索力。

吊杆微元的平衡微分方程可以描述为^[4]:

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} - m \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \quad (1)$$

式中: y 为吊杆的横向坐标; x 为吊杆的纵向坐标; m 为吊杆单位长度的质量, kg/m ; EI 为吊杆截面的弯曲刚度; T 为吊杆的索力, kN 。

当吊杆的边界情况能够简单为铰支时,则式(1)的解可描述为:

$$T = 4m \left(\frac{f_n^2}{n^2} \right) L^2 - EI \pi^2 \left(\frac{n^2}{L^2} \right) \quad (2)$$

式中: f_n 为吊杆的第 n 阶振动频率, Hz ; n 为振动阶次; L 为吊杆的计算长度, m 。

本桥每根吊杆均由 55 根直径为 5.0 mm 高强度平行钢丝绳组成,外设两层 PE 护套,吊杆拉索的线密度值为 9.77 kg/m 。

假设知道吊杆的计算长度 L ,每延米的质量 m ,吊杆截面的弯曲刚度 EI ,再测出吊杆的前几阶次振动频率,便可由式(2)求吊杆的索力。本次选取吊杆上、下锚点间的距离为计算长度 L 。吊杆索体构造示意图如图 11 所示。

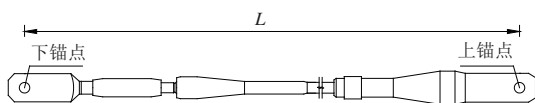


图 11 吊杆索体构造示意图

3.2 测试结果与分析

本文典型算例选取主桥吊杆特征的 SN03、SN19、SN36、SS05、SS30、SS44 吊杆进行测定分析,并与往年(2013 年)索力实测值进行对比。本次实测基频和两次吊杆索力实测值对比见表 1,吊杆实测索

力与成桥索力对比如图 12 所示。

表 1 两次吊杆索力实测值对比

吊杆编号	实测频率 / Hz	本次实测索力 / kN	往年实测索力 / kN	索力偏差 / %
SN03	4.102	195	197	-1.02
SN19	3.223	180	197	-8.63
SN36	2.441	169	160	5.63
SS05	2.832	163	168	-2.98
SS30	3.027	249	224	11.16
SS44	2.832	227	214	6.07

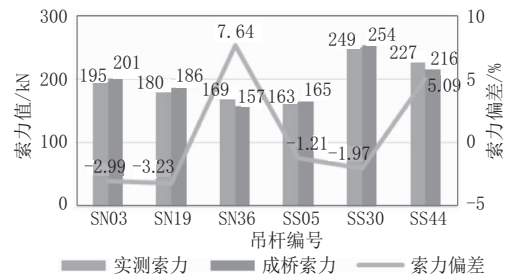


图 12 吊杆实测索力与成桥索力对比

针对本次测试结果,实测索力与往年索力对比来看索力偏差的绝对值基本上保持在 10% 范围以内,其中 SS30 吊杆索力偏差为 11.16%,主要原因是通车后主桥各结构受各种因素影响产生了内力重分布;同时,实测索力与成桥索力对比来看索力偏差的绝对值在 10% 范围以内,综合表明该变化未对主桥受力产生较大的影响,并未因此而产生明显结构性病害,表明主桥大部分吊杆索力在通车运营状态下保持稳定,未产生较大的变异。

4 主桥自振特性测试

4.1 自振特性测试与分析

现场对主桥自振特性的检测,分别在南、北主桥跨中位置设置一个竖向拾振器。本次主桥脉动试验结果见表 2、表 3。

表 2 北主桥脉动试验结果

阵型	实测频率 f_{mi}/Hz	阻尼比 %	理论频率 f_{di}/Hz	f_{mi}/f_{di}
钢箱梁竖向一阶	2.125	1.413	1.714	1.24
钢箱梁竖向二阶	2.650	0.582	2.394	1.11
钢箱梁竖向三阶	3.275	0.610	3.007	1.09

表 3 南主桥脉动试验结果

阵型	实测频率 f_{mi}/Hz	阻尼比 / %	理论频率 f_{di}/Hz	f_{mi}/f_{di}
钢箱梁竖向一阶	2.100	1.325	1.714	1.23
钢箱梁竖向二阶	2.650	0.702	2.394	1.11
钢箱梁竖向三阶	3.325	0.687	3.007	1.11

4.2 测试结果与分析

主桥脉动试验结果表明,北幅主桥钢箱梁上部结构实测竖向一阶次频率为 2.125 Hz,有限元模型计算基频为 1.714 Hz,实测基频与理论基频的比值为 1.24;南幅主桥钢箱梁上部结构实测竖向一阶次频率为 2.100 Hz,有限元模型计算基频为 1.714 Hz,实测基频与理论基频的比值为 1.23。根据实测基频和理论基频的比值对结构整体进行评定^[5],主桥上部结构主梁实际整体刚度超过了理论刚度;结构各主要阶次的阻尼比均处于 0.582% ~ 1.413%,在设计正常范围内。

5 结 语

(1)吊杆是承上启下的关键构件,应定期监测。考虑到主桥结构为多次超静定体系,且刚度分配较复杂,受温度影响较大,应加强对索力变化较大的拉索进行重点监测。同时每年应分冬夏两季对索力进行测试,并尽量保持与上一年测试温度的一致,以便更加科学、客观地对索力的变化进行评价。

(2)桥梁振动特性可以在整体上反映结构的安全韧性。本次测试结果也表明,各阶实测振型与理论计算对应振型基本一致,表明主桥刚度分布和质量

分配均与设计较为相符。

(3)鉴于该桥采用空间异型拱肋结构,后续应加强对横向系杆力的监测。

(4)对于该类多跨空间异型刚梁柔拱组合体系无推力拱桥应加强桥梁运营中的安全韧性状态监测。复杂结构下的桥梁的检测与运维是极其重要的,以往传统的方法则需要大量的人力物力。如今可借助于多个学科领域的桥梁结构监测系统,有针对性、实时不间断地对桥梁结构“安全韧性”状态进行监测和评估,对桥梁的运营安全和提高桥梁的管理水平具有极大的指导意义。

参考文献:

- [1] 陈勇,崔鑫,何天铭. 基于有限元模型的拱桥吊杆索力测试方法研究[J]. 华东公路, 2017(3):5-7.
- [2] 胡力,雷林. 基于自振参数结构性能评价方法探讨[J]. 建筑工程技术与设计, 2014(28):370-370.
- [3] 王建飞. 拱桥吊杆索力的振动法测量[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2012.
- [4] 朱卫国,申永刚,项贻强,等. 梁拱组合体系桥柔性吊杆索力测试[J]. 中南公路工程, 2004, 29(1):21-23, 36.
- [5] 李龙,周伟明,梁长海,等. 小边跨梁拱组合体系桥梁静动力荷载试验与结构评定分析[J]. 铁道建筑, 2018, 58(10):10-13.

《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