

DOI:10.14048/j.issn.1671-2579.2023.04.016

多塔悬索桥附属结构耐久性参数研究

秦肖¹, 潘济¹, 肖汝诚^{2*}

(1.温州瓯江北口大桥公司,浙江温州 325000;2.同济大学土木工程学院,上海市 200092)

摘要:附属结构作为桥梁结构中的重要构件,其耐久性会影响桥梁整体结构的使用寿命。由于多塔悬索桥整体结构更柔,变形更大,附属结构处累积位移量也更大,因此附属结构耐久性问题在多塔悬索桥下更为突出。为了定性分析桥梁结构的体系参数(包括塔梁连接方式和缆梁连接方式)对附属结构耐久性的影响,建立某四塔悬索桥的有限元模型,利用影响线加载的方式进行计算,得到不同塔梁连接方式以及缆梁连接方式下的梁端以及支座位置处的位移累积量。结果表明:采用塔梁固结方式减少梁端纵向位移和转角位移累积量的效果最显著;塔梁纵向连接的约束越强,梁端以及支座处纵向位移越小;设置中央扣的方式有利于减少纵向位移累积量,同时也能减少转角位移的累积量。

关键词:多塔悬索桥;附属结构;耐久性;体系参数

中图分类号:U443.3

文献标志码:A

0 引言

桥梁附属结构是指支座、伸缩缝等构件,其作为桥梁的重要构件,主要作用是将桥段衔接成桥梁整体,并有助于减小温度、风等外部荷载对桥梁整体结构产生的过大位移,从而有效保护桥梁结构安全。桥梁结构的寿命不仅限于结构强度和稳定性等,附属结构的耐久性也影响桥梁的耐久性和服役年限。然而设计师在设计过程中往往会忽略附属结构的耐久性状况,使附属结构在桥梁运营期间多次出现损坏,甚至可能影响桥梁整体的结构安全。尤其是对于多塔悬索桥这种结构形式,相较于两塔悬索桥,它可以减小锚碇及桥塔规模与施工难度,具有十分明显的技术、经济优势^[1-3]。但多塔悬索桥整体结构刚度较小,在静力和动力作用下结构变形较大,在约束控制方向上的附属装置往往需要承担较大的变形^[4-6],因而附属结构的耐久性问题愈加突出。

针对附属结构耐久性的问题,国内外学者进行了一系列的研究^[7-8]。部分学者通过调研现有桥梁附属结构破坏的病害状况,提出改善附属结构耐久性设计措施^[9-11]。一些学者通过健康监测的方式获得既有桥梁梁端位移等的发展情况^[12-13],同时进行了附

属装置自身设计参数对附属结构内力的影响分析,来研究这些参数对耐久性的影响^[14-16]。还有学者为避免附属结构损坏对桥梁结构的影响,提出无伸缩缝桥梁等新型结构形式^[17-18]。但对桥梁结构体系自身参数的研究较少,不同的塔梁连接方式下附属结构处的累积位移不同,为保证附属结构的服役寿命,合理改变塔梁连接方式将有利于提高附属结构的耐久性。因此,本文针对支座和伸缩缝等桥梁附属结构,通过定性分析的方法,分析桥梁结构体系参数对附属结构耐久性的影响,明确结构体系的改变对于附属结构耐久性的改善趋势,从而为概念设计过程中体系参数的确定提供参考。

1 附属结构累积位移

在自然荷载作用下,多塔悬索桥附属结构处不仅会产生水平位移,还会因梁体挠曲产生转角位移,图1为梁端位移示意图。其中纵桥向为 x 轴,竖向为 y 轴,横桥向为 z 轴;支座约束梁体竖向 y 方向的线位移 U_y 、横桥向的线位移 U_z (有时不约束)以及绕 x 轴的转动位移 ROT_x 。因此梁端主要产生的位移为纵桥向位移 U_x 、绕竖向 y 轴的转角 ROT_y 以及绕横桥向 z 轴的转角 ROT_z 。

收稿日期:2021-12-27

作者简介:秦肖,男,硕士,高级工程师.E-mail:18165213103@163.com

*通信作者:肖汝诚,男,博士,教授.E-mail:1932487@tongji.edu.cn

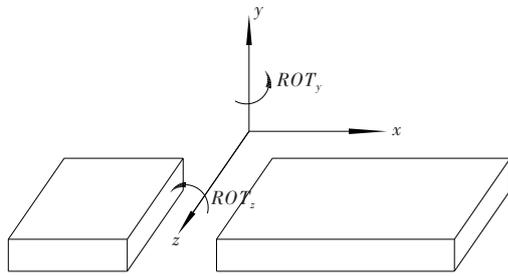


图1 多塔悬索桥梁端位移

从文献[19]监测结果来看,由于悬索桥纵向约束的不足,悬索桥梁端纵向位移平均日累积量远超设计预计量。其中由车辆和风荷载引起的累积位移值占了绝大部分,由温度引起的累积位移值只是很小的一部分(对于苏通大桥温度变化仅占9%,润扬大桥仅占0.56%,对于悬索桥结构更柔,更易受到风、车辆荷载的影响)。在车辆以及风荷载的作用下,悬索桥的纵向位移以分钟级的频率产生几厘米的纵向位移,从而形成了大量的位移累积量。以润扬长江公路大桥南汊桥为例,自桥梁通车以来纵向位移累积量高达140 km,而常规设计的PTFE滑块材料的寿命仅20 km,当伸缩缝累积位移超过允许值时,滑块会被完全磨损,加速伸缩装置的破坏^[20]。

同样的问题也产生在梁端转角方面,例如日本的明石海峡大桥、来岛三桥的梁端最大竖向转角 ROT_z 仅在活载作用下已经超出0.02 rad的一般限值^[4],而在交通量较大的情况下,转角的累积值也将影响到伸缩缝的使用。对于横向转角的影响,在文献[4]中显示悬索桥主要考虑横风作用下梁端横向转角,而在汽车荷载作用下横向转角可忽略不计。

2 定性分析方法

由上述调研发现,多塔悬索桥的梁端位移受到结构体系参数以及不同荷载作用的影响,同时大跨径缆索承重桥梁梁端位移长时间的累积量会达到非常可观的数量,这也是引起附属结构磨损和疲劳问题的主要原因之一^[19]。

文献[4]计算结果显示,附属结构处纵向位移 U_x 与 ROT_z 主要由车辆荷载与静风作用引起,而 ROT_y 主要由横风作用引起。但由于车辆荷载和风荷载均属于随机荷载,无法通过计算得到梁端累积位移量的计算值,只能通过统计数据来展现。因此,为确定

结构设计参数对梁端位移累积量的影响,对于移动荷载的情况,采用影响线加载的方式,按照规范选取车辆荷载,模拟单辆汽车从上桥至下桥的加载过程,并乘以相应的车辆数,定性分析移动荷载下结构设计参数对梁端位移累积量的影响;而对于风荷载,由于一般计算过程假设布载于整个结构体系上,只能得到结构设计参数对幅值的影响,而无法得到累积值。综上所述,本文将通过建立有限元模型,求解影响线形式,并利用影响线布载来分析移动荷载下结构设计参数对附属结构耐久性的影响。

3 参数分析

3.1 研究对象

基于实际工程,建立立面布置如图2所示的四塔悬索桥计算模型,该四塔悬索桥3个主跨的跨径均为800 m,主缆的分跨布置为(350+800+800+800+350) m。主跨矢跨比相同,均为1/10,矢高为80 m。加劲梁采用钢桁架梁。主塔均为混凝土桥塔,塔高145.5 m。利用Midas/Civil软件建立该四塔悬索桥的空间有限元模型,分析各种参数(表1)变化对附属构件位移量的影响。

表1 四塔悬索桥构件特性主要参数

构件	截面面积 A/m^2	弹性模量 E/Pa	抗扭刚度 $GI_x/$ $(N \cdot m^2)$	竖向抗弯 刚度 $EI_y/$ $(N \cdot m^2)$	横向抗弯 刚度 $EI_z/$ $(N \cdot m^2)$
主缆	0.517 4	1.95×10^{11}	—	—	—
吊杆	0.005 9	1.95×10^{11}	—	—	—
主梁	2.241 0	2.10×10^{11}	1.85×10^{11}	1.55×10^{13}	7.35×10^{13}
桥塔	30.24~42.56	3.45×10^{10}	—	—	—

模型基本边界条件为:桥塔塔底和主缆锚固处采用固结约束,边塔处约束加劲梁竖向、横向和绕顺桥向扭转3个自由度,中塔处约束加劲梁竖向、横向2个自由度,其他边界条件随不同结构体系关键参数的选取分别更改。

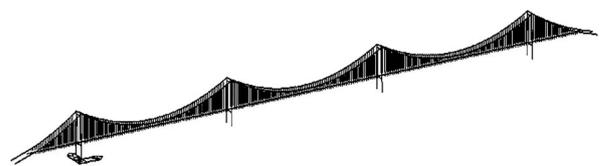


图2 四塔悬索桥模型

多塔悬索桥梁端位移累积量必然受到悬索桥结

构设计参数的影响,结构设计参数分为总体布置参数和体系参数,由于多塔悬索桥梁端位移这一因素可以通过及时更换等方法解决,因而总体布置参数尽管会影响梁端位移累积量,但实际设计过程中不会通过改变总体布置参数来解决梁端位移,所以最后选择体系参数并研究其对梁端位移累积量的影响。

体系参数包括塔梁连接方式和缆梁连接方式,塔梁连接方式主要包括竖向连接方式和纵向连接方式。考察的参数主要为梁端、边塔支座位置处以及中塔支座位置处的纵向位移量以及竖向转角。

3.2 塔梁竖向连接方式

常见的悬索桥竖向约束方式主要有以下4种:在中塔处设置 0° 吊索;中塔桥塔处设置竖向约束支座;中塔处塔梁固结;中塔不进行竖向约束。以中塔处设置竖向约束支座为比较模型,研究不同竖向约束情况下梁端以及支座处位移的累积量,采用的车流量为40 000辆/d,主要结果见图3。其中,设置 0° 吊索采用与吊杆相同材料的弹性索在中塔处连接中塔与加劲梁。

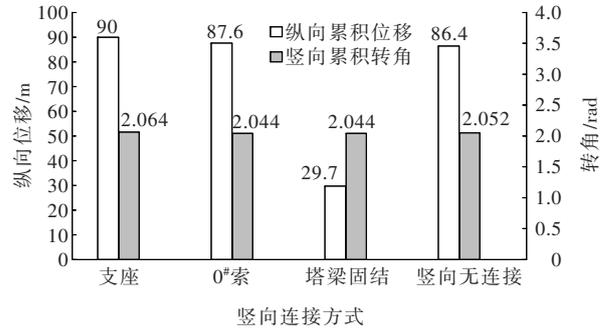
由图3可知:①相较于支承体系, 0° 索能够减少梁端、边塔支座以及中塔支座的位移累积量,减幅为0.5%~2%,也能够减少竖向转角的累积量,减幅约为1%;②相较于支承体系,塔梁固结方式能够减小梁端、边塔支座位移总量与竖向转角值,对于位移总量的减幅尤为明显,约为65%,竖向转角的减幅较小;③相较于支承体系,竖向无连接的方式能够减小位移总量,且减小幅度相较于 0° 索更大。

由于 0° 索相较于支座可以在偏移的过程中限制加劲梁的竖向位移,因而 0° 索能有效减少梁端的纵向位移累积量。塔梁固结大大增加了加劲梁的纵向约束,同时对转角约束也不容忽视。竖向无连接方式减弱了加劲梁的竖向约束,能够更好地适应加劲梁的变形,从而减少了纵向位移和转角,但同时对于加劲梁、吊杆的变形不利。

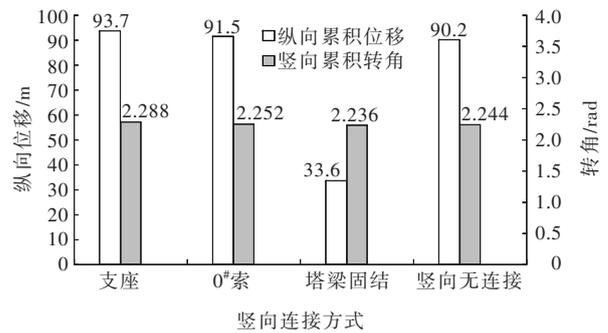
从上述结果可知:塔梁固结能更好地减小累积位移量, 0° 索和竖向无连接的方式也有一定程度减弱作用,但不能忽视这两种连接方式对结构静力特性的影响。

3.3 塔梁纵向连接方式

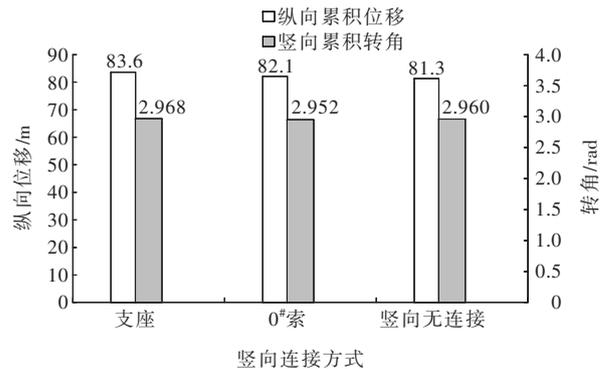
多塔悬索桥常见的纵向连接方式如下:纵向不



(a) 梁端



(b) 边塔支座处

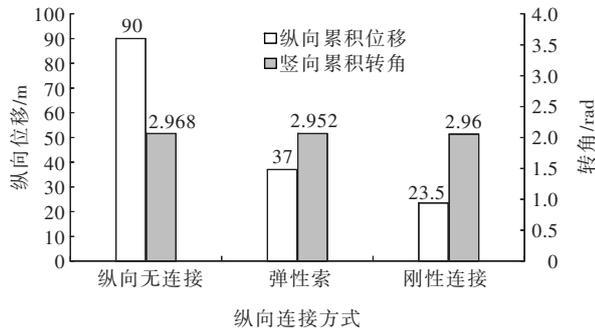


(c) 中塔支座处

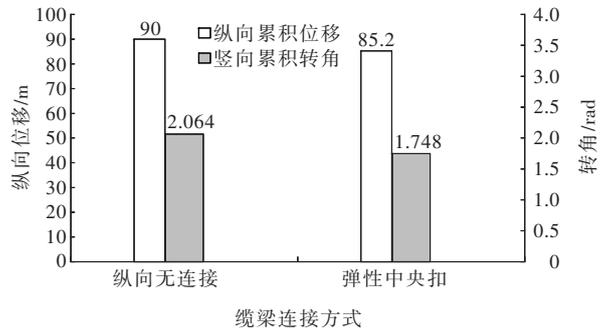
图3 塔梁竖向连接方式对附属结构处位移与转角的影响

约束(全桥纵漂);中塔处弹性约束;中塔处刚性约束。其中弹性约束通过采用与吊杆相同材料的弹性索将加劲梁与中塔连接起来,并施加10 000 kN的初拉力。以纵向不约束为比较模型,研究不同纵向约束情况下,梁端及支座位置处位移累积量,计算结果如图4所示。

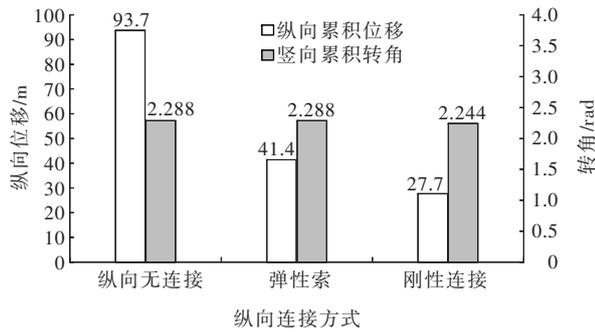
从图4可知:①相较于纵向无连接,设置弹性索的方式能较大幅度地减小位移总量,对梁端、边塔支座处、中塔支座处减幅约为59%、56%、39%,减幅大小由弹性索初拉力确定,但同时设置弹性索对竖向转角基本无影响,轻微增加了中塔支座处的竖向转角;②相较于纵向无连接,塔梁之间刚性连接大幅减小



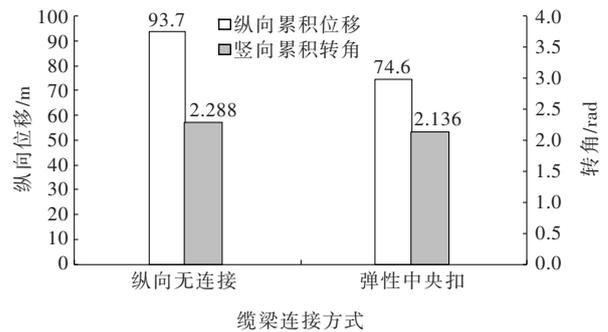
(a) 梁端



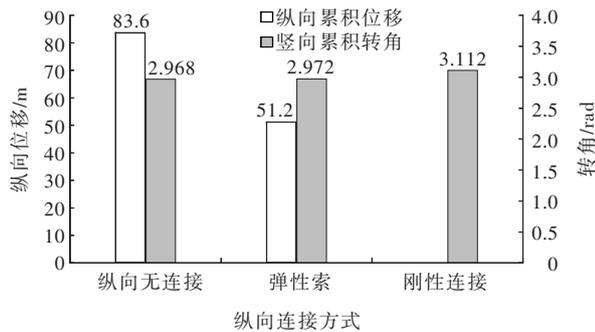
(a) 梁端



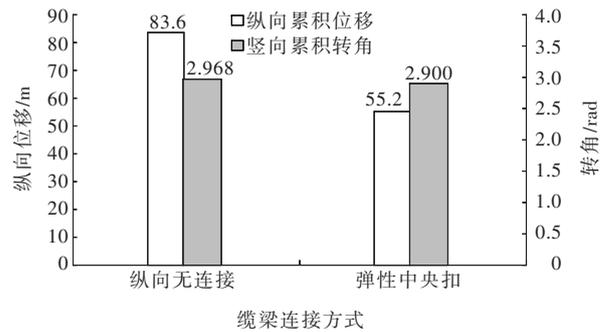
(b) 边塔支座处



(b) 边塔支座处



(c) 中塔支座处



(c) 中塔支座处

图4 塔梁纵向连接方式对附属结构处位移与转角的影响

了纵向位移总量,并且比弹性索的减小幅度更大,梁端和边塔支座处位移减幅分别为74%、70%,对于竖向转角,虽然减小了梁端和边塔支座处的竖向转角,却增加了中塔处的竖向转角,增幅约为5%。

弹性索与刚性连接的方式都是增强了加劲梁的纵向约束,且约束强度越强,纵向位移减弱得越明显,但同时纵向位移的减少,使得约束增强处即中塔约束处的转角也相应增加。

3.4 缆梁连接方式

缆梁的连接方式为是否设置中央扣。为控制多塔悬索桥变形,在主跨跨中位置处设置中央扣将主缆同加劲梁连接。缆梁连接方式对中塔支座位移与转角的影响见图5。

图5 缆梁连接方式对中塔支座位移与转角影响

从图5可见:①设置中央扣后,梁端、边塔支座和中塔支座处纵向位移总量减小,且越靠近中塔位置处减幅越大,梁端、边塔支座、中塔支座处减幅分别为5.3%、20.4%、34.0%;②设置中央扣后,对竖向转角也有一定减小作用,梁端、边塔支座和中塔支座处减幅分别为15.3%、6.6%、2.3%。

设置中央扣的方式实际上增强了加劲梁的纵向约束,因此减少了纵向位移的累积量,同时设置中央扣未增加支座以及梁端的纵向约束,使得该处的转角位移也有所减少。中央扣的设置能够提高悬索桥的刚度,对累积位移和转角都有减弱的功能,但同时中央扣可能会增加加劲梁轴力。

4 结 论

本文通过定性分析方法研究桥梁结构的体系参数(包括塔梁连接方式和缆梁连接方式)对附属结构耐久性的影响,得到以下主要结论:

(1) 对于塔梁竖向连接方式,中塔处竖向无连接相较于 0° 索、支座支承的方式而言更能减少纵向位移与转角位移累积量,塔梁固结方式的减弱效果最显著。

(2) 对于塔梁纵向连接方式,中塔纵向连接刚度越大,对梁端以及支座处纵向位移量限制越大,但同时约束处转角也有一定程度的增加,选取过程中还要考虑增加加劲梁的轴力。

(3) 对于缆梁连接方式,设置中央扣的方式有利于减少纵向位移累积量,同时也能减少转角位移的累积量,但不可忽视其对加劲梁轴力的增加。

参 考 文 献:

- [1] 沈锐利,侯康,张新.三塔四跨悬索桥合理结构布置形式研究[J].中外公路,2019,39(3):101-106.
- [2] 肖刚.三塔悬索桥主缆与鞍座抗滑移设计研究[D].成都:西南交通大学,2016.
- [3] 李万恒,王元丰,李鹏飞,等.三塔悬索桥桥塔适宜刚度体系研究[J].土木工程学报,2017,50(1):75-81.
- [4] 王统宁.大跨径缆索承重桥梁梁端位移及组合方法研究[D].西安:长安大学,2010.
- [5] 董奎吾,刘世忠,栗振锋,等.大跨度人行悬索桥动力特性分析[J].太原科技大学学报,2022,43(6):549-554.
- [6] 曹锋,郑明杰,马鹏,等.多跨加劲梁悬索桥非线性静风稳定性分析[J].中外公路,2022,42(4):87-92.
- [7] 谢肖礼,杨创捷,覃霞.一种减少多塔悬索桥塔顶不平衡力的方法[J].石河子大学学报(自然科学版),2022,40(3):320-326.
- [8] 张永涛,李京,闫勇,等.斜拉-悬索协作体系桥梁关键阶段研究[J].中外公路,2018,38(2):129-134.
- [9] 敬大德,樊长刚,何尽川.沿海地区桥梁附属设施的耐久性研究与设计[J].四川建筑,2013,33(6):146-147.
- [10] 周诗云,李国平,骆梦.景区人行悬索桥受力特征研究[J].中外公路,2022,42(1):151-157.
- [11] 陈国红,宋晓莉.悬索桥桥塔纵向计算长度系数研究[J].中外公路,2022,42(6):126-130.
- [12] 邓扬,李爱群,丁幼亮,等.基于长期监测数据的大跨桥梁结构伸缩缝损伤识别[J].东南大学学报(自然科学版),2011,41(2):336-341.
- [13] 朱辉龙.大跨度悬索桥主缆力学行为及滑移特性研究[D].徐州:中国矿业大学,2022.
- [14] 付岚岚.大跨度桥梁伸缩装置的研究[D].西安:长安大学,2006.
- [15] 邓扬,李爱群,丁幼亮.大跨悬索桥梁端位移与温度的相关性研究及其应用[J].公路交通科技,2009,26(5):54-58.
- [16] 张一卓.桥梁伸缩装置疲劳破坏分析及寿命估算[D].西安:长安大学,2005.
- [17] 陈宝春,付磊,庄一舟,等.中国无伸缩缝桥梁应用现状与发展对策[J].中外公路,2018,38(1):87-95.
- [18] 向鹏.多塔悬索桥若干问题研究[D].武汉:武汉理工大学,2023.
- [19] 刘成才,刘杰,黄灵宇.缆索承重桥梁附属结构工作状态分析[J].金陵科技学院学报,2017,33(1):29-34.
- [20] 张宇峰,陈雄飞,张立涛,等.大跨悬索桥伸缩缝状态分析与处理措施[J].桥梁建设,2013,43(5):49-54.