

## 大跨度独塔混合梁斜拉桥主梁纵漂影响分析

涂光亚, 欧阳星

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:**对于大跨度半漂浮体系独塔混合梁斜拉桥,为了使主塔向边跨发生预偏以抵抗成桥后汽车荷载和其他可变作用带来的不利影响,在施工过程中边跨的索力一般会大于主跨的索力,在解除临时固结之后,该不平衡索力会使主梁发生纵漂现象。桥梁合龙后铺装桥面系和汽车荷载作用也会对主梁产生新的不平衡水平力,使主梁发生纵漂。为了研究独塔混合梁斜拉桥的纵漂对塔偏、标高、索力和应力的影响,该文采用有限元方法和BDCMS软件对广东省韶关市江湾大桥进行了计算分析。计算结果表明:对于半漂浮体系独塔混合梁斜拉桥,在体系转换、铺装桥面系及主跨布置汽车荷载工况下主梁均有一定程度的纵漂;纵漂对塔顶偏位影响较大,对主梁标高和斜拉索索力有一定影响,对主梁应力影响较小;在计算主梁纵漂时应考虑支座摩擦力,否则会引起计算结果失真或误差过大。

**关键词:**独塔斜拉桥;纵漂;有限元分析;支座摩阻力

**中图分类号:**U448.27

**文献标志码:**A

斜拉桥是一种由塔、梁、索3种基本构件组成的组合体系结构,以结构受力性能优越、跨越能力大、造型丰富及抗震性能良好等优势成为大跨径桥梁中优选的一种桥型<sup>[1]</sup>。斜拉桥主梁主要采用预应力混凝土箱梁、钢箱梁、组合梁以及混合梁4种形式,其中混合梁斜拉桥边、中跨分别采用混凝土梁、钢箱梁,两者通过连接件以及预应力筋或锚杆等结合在一起,使得斜拉桥具有边中跨重力均衡、跨越能力强、整体刚度大、建造成本低等一系列优点,所以近年来混合梁斜拉桥的工程实例不断增加<sup>[2-5]</sup>。目前对于独塔混合梁斜拉桥,其研究主要集中在钢-混结合梁段刚度的匹配、结合段的结合形式、长度、混凝土的填充量以及结合段受力特性,对于独塔混合梁斜拉桥的纵漂性能研究较少。

斜拉桥在采用悬臂施工法施工时,塔梁之间需要临时固结,索塔两侧的梁体因自重等荷载不可能做到绝对平衡,因此会产生一个不平衡弯矩,并且为了成桥后能够较好地承受汽车荷载,边跨索力一般会大于主跨索力从而使塔向边跨发生预偏,此时又会产生一个不平衡的水平力,在解除临时约束时,在上述各种不平衡水平力作用下,斜拉桥的主梁会发生一定量的纵漂。在斜拉桥合龙成桥后,铺装桥面系和汽车荷载也会使主梁受到新的不平衡水平力,从而发生纵漂。该文以江湾大桥为背景,研究大跨度独塔混合梁斜拉桥纵漂对塔偏、标高、索力和主梁应力的影响。

## 1 工程概况

江湾大桥是广东省韶关市曲江大道项目上的一座独塔双索面钢-混凝土混合梁斜拉桥,桥跨布置为(33+102+183)m,钢混凝土结合点设在跨径102m的边跨处,距离主塔中心84.6m,其结构体系为半漂浮体系,在索塔处设置有竖向支座。桥面纵坡采用非对称纵坡,主塔北纵坡为1.65%,主塔南纵坡为0.95%,竖曲线半径为17200m,其立面布置如图1所示。江湾大桥桥梁横断面组成为1.0m(风嘴)+3.25m(人非机动车道)+1.50m(拉索区)+0.5m(防护栏)+15.50m(车行道)+1.0m(防护栏)+15.50m(车行道)+0.5m(防护栏)+1.50m(拉索区)+3.25m(人非机动车道)+1.0m(风嘴)=44.5m;横桥向设双向2%横坡。

江湾大桥主梁采用钢箱梁和混凝土箱梁两种,其中钢箱梁采用整体式扁平流线形断面,标准断面如图2(a)所示。全桥钢箱梁划分为A~H共8种类型,25个梁段,最大起吊重量约为348t;混凝土箱梁外形与钢箱梁一致,采用单箱五室截面(3个大室和2个小边室),标准断面如图2(b)所示。索塔是由塔柱、横梁组成的拱形框架结构,塔柱为普通钢筋混凝土结构,下塔柱为实心矩形断面,上、中塔柱为空心矩形断面,横梁

收稿日期:2021-08-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:51878073)

作者简介:涂光亚,男,博士,副教授, E-mail:runner\_mail@126.com

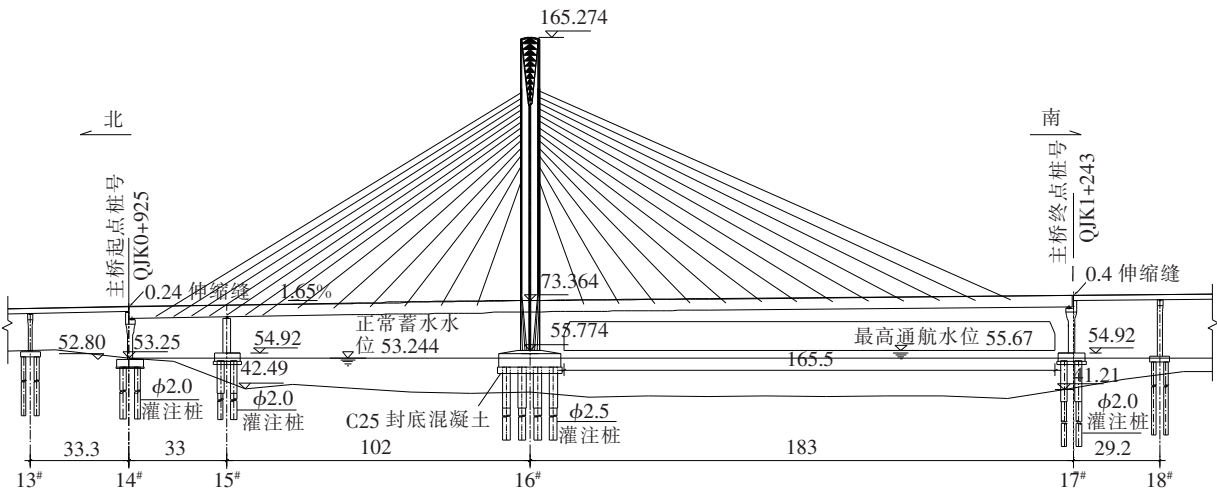


图1 江湾大桥主桥立面布置图(单位:m)

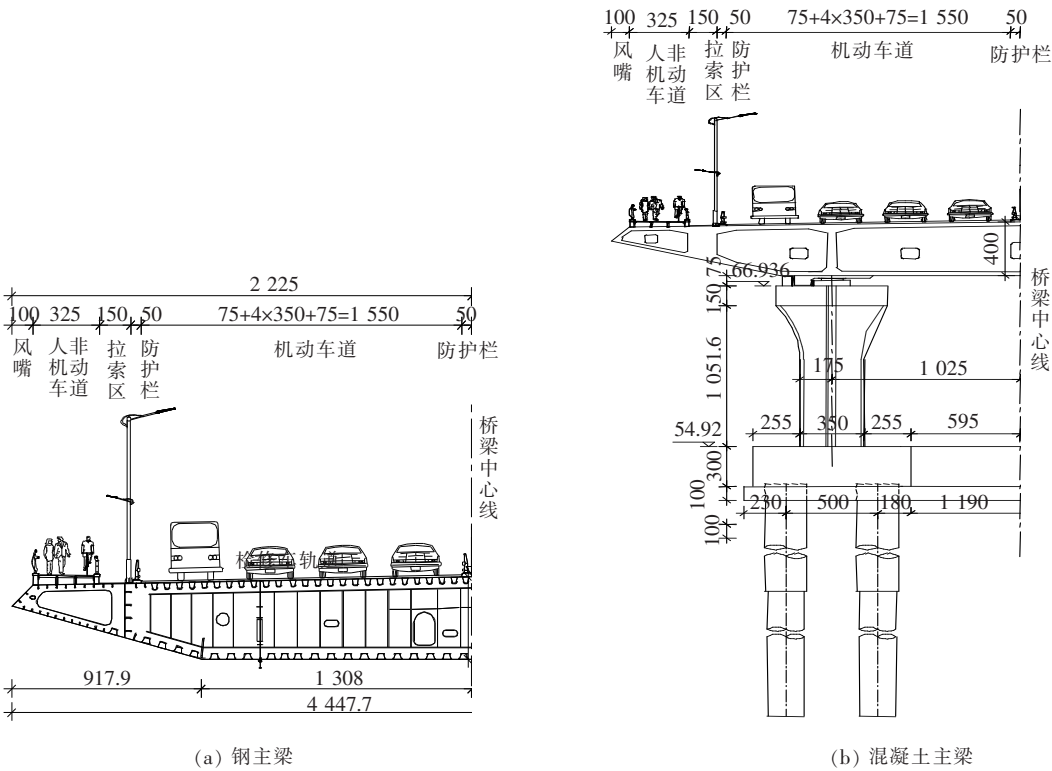


图2 主梁一般构造图(1/2 截面)(单位:cm)

则为预应力混凝土结构。塔高 109.5 m,桥面至承台顶高 92 m。塔上布置 26 对斜拉索,主塔两侧各 13 对,立面呈扇形,其中主塔北侧钢箱梁上 6 对,混凝土箱梁上 7 对。斜拉索采用高强度环氧涂层钢绞线索,共 5 种类型(43、55、62、73 和 109 束)。斜拉索在钢箱梁上顺桥向标准间距为 12 m,混凝土梁上调整为 6 m,塔上竖向标准索距为 2 m。

2 计算模型与工况

根据江湾大桥的工程实际,采用平面杆系程序 BDCMS 建立有限元计算模型。斜拉索为两端带刚臂的索单元,主塔和主梁为普通梁单元,混凝土梁段的支架为只受压的桁架单元。边界条件为各墩底固结。江湾大桥有限元计算模型单元节点编号如下:

- (1) 主梁节点:1~123。
- (2) 墩节点:124~143,225~234,235~243,244~253;索塔节点:144~224。
- (3) 主梁混凝土梁单元:1~34;主梁钢箱梁单元:35~122。
- (4) 墩单元:123~143,250~259,260~268,269~278;索塔单元:144~223;斜拉索单元:224~249。

大桥按照实际施工过程共划分 17 个大工况,109 个小工况。在计算分析中,共考虑 6 种工况下主梁的纵漂,工况 1、3、5 为不考虑支座摩擦力体系转换、铺装桥面系以及主跨布置汽车荷载,工况 2、4、6 则为上述工况下考虑支座摩擦力。

由于模型中没有设置模拟支座摩擦力的单元,故将各支座摩擦力作为外荷载作用在支座上的主梁节点处<sup>[8]</sup>。在该模型中支座摩擦力按最大静摩擦力考虑,根据支座厂家提供的数据以及查询规范取支座摩擦系数  $\mu$  为 0.03,支座摩擦力大小为各支座反力与支座摩擦系数相乘,其方向与主梁纵漂方向相反。

按以上方法考虑铺装桥面系工况下支座摩擦力时,主梁纵漂方向与不考虑摩擦力的计算结果相反,表

明外荷载不足以克服支座静摩擦力,支座不会滑动,主梁不会发生纵漂,此时修改模型,在支反力最大处给主梁加一个水平限位支座,各支座支反力见表 1。

表 1 江湾大桥铺装桥面系工况支座反力

墩号	支座反力/kN	墩号	支座反力/kN
14 <sup>#</sup>	9 560.1	16 <sup>#</sup>	12 262.3
15 <sup>#</sup>	36 596.5	17 <sup>#</sup>	9 394.3

由表 1 可知:铺装桥面系工况下支反力最大的支座为 15<sup>#</sup>墩支座,故将水平限位支座加在 15<sup>#</sup>墩支座的主梁处,读取其所受的不平衡水平力,随后将水平限位支座删除同时将上述不平衡水平力作为外荷载作用于支座上的主梁节点处,以此来代替支座摩擦力的影响<sup>[9]</sup>。

3 计算结果

3.1 主梁纵漂对塔顶偏位的影响

通过 BDCMS 计算分析,得到上述 6 种工况下江湾大桥主梁的纵漂及塔偏结果如表 2 所示。

表 2 江湾大桥主梁水平位移及塔偏 mm

项目	不考虑支座摩擦力			考虑支座摩擦力		
	体系转换	铺装桥面系	主跨汽车荷载	体系转换	铺装桥面系	主跨汽车荷载
主梁纵漂(16 <sup>#</sup> 墩顶处)	52.4	-57.1	-48.9	14.6	-2.4	-16.1
工况发生前塔顶偏位	-124.6	-24.1	-40.9	-124.6	-80.3	-29.3
工况发生后塔顶偏位	-66.7	-40.9	-61.7	-112.6	-29.3	-7.5
塔顶偏位增量	57.9	-16.8	-20.8	12.0	51.0	21.8

注:正号表示往江侧方向,负号表示往岸侧方向。

由表 2 可知:主梁纵漂对塔顶偏位有最直接和明显的影响。体系转换之前,为了使主塔往岸侧方向有一定的预偏,岸侧斜拉索的水平分力大于江侧斜拉索的水平分力。体系转换之后,主梁和主塔的不平衡水平力均在一定程度上得以释放,所以塔偏变化的方向与主梁纵漂的方向相同(均为往江侧),当主梁纵漂为 52.4 mm 时,塔偏的变化量为 57.9 mm,纵漂使得主塔在体系转换之前通过索力所获得的往岸侧方向的预偏值减小。

在铺装桥面系与主跨汽车荷载工况,由于在相应荷载作用下江侧索力增量大于岸侧索力增量,主梁纵漂的方向与体系转换时相反(往岸侧),当不考虑摩擦力时,在荷载的作用下主塔本来要往江侧偏,但叠加了

纵漂影响后(纵漂方向为岸侧),主塔反而往岸侧偏,在这两个工况下塔偏增量分别为 -16.8、-20.8 mm。可见由于纵漂的影响使得塔偏的方向都发生了变化。

当考虑支座摩擦力时,主梁纵漂的程度大为减小,在体系转换、铺装桥面系和主跨汽车荷载工况,主梁纵漂分别减小了 72.1%、95.8%和 67.1%。在铺装桥面系和主跨汽车荷载工况下,塔偏增量分别为 51.0、21.8 mm,与不考虑摩擦力时的计算结果相差较大,可见支座摩擦力对纵漂和塔偏的计算结果均有较大影响。

3.2 主梁纵漂对主梁标高的影响

通过 BDCMS 计算分析,得到各工况下主梁竖向位移结果如图 3 所示。

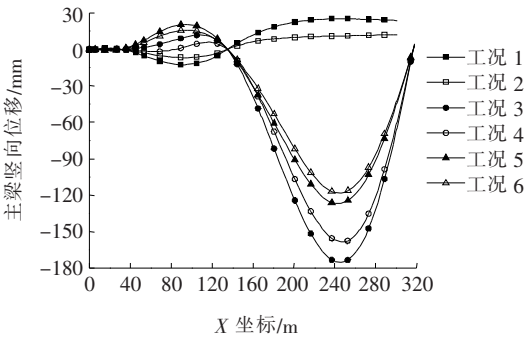


图3 江湾大桥主梁竖向位移比较

由图3可知:主梁纵漂对主梁标高有一定的影响,当主梁往江侧发生纵漂时,中跨竖向位移向上,边跨竖向位移向下;反之当主梁往岸侧发生纵漂时,中跨竖向位移向下,边跨竖向位移向上。在体系转换工况,主梁往江侧发生52.4 mm的纵漂,中跨竖向位移最大值为25.1 mm,边跨竖向位移最小值为-12.6 mm。

在铺装桥面系与主跨汽车荷载工况,主梁往岸侧发生纵漂,在荷载与主梁纵漂共同作用下中跨向下的竖向位移最小值分别为-175.3、-126.8 mm;边跨向上的竖向位移最大值分别为20.5、11.7 mm。

当考虑摩擦力时,主梁纵漂减小,对主梁竖向位移的影响也随之减小。在体系转换工况,中跨最大竖向位移减小为12 mm,边跨最大竖向位移减小为-6.9 mm。考虑摩擦力与不考虑摩擦力相比,主梁竖向位移变化最大值为14.1 mm。在铺装桥面系与主跨汽车荷载工况,中跨向下的竖向位移最小值增大为-158.4、-118.1 mm,边跨向上的竖向位移最大值减小为15.8、5.7 mm。考虑摩擦力与不考虑摩擦力相比,主梁竖向位移变化最大值分别为18.5、9.7 mm。可见支座摩擦力对主梁标高的计算结果有一定的影响。

3.3 主梁纵漂对斜拉索索力的影响

通过BDCMS计算分析,得到各工况下斜拉索索力变化值如图4所示。

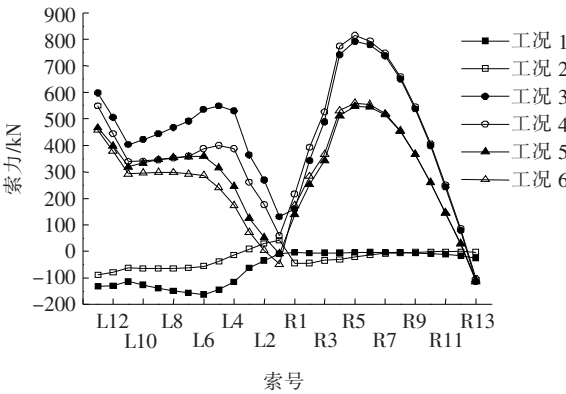


图4 江湾大桥斜拉索索力比较

(注:图中L为小里程侧;R为大里程侧)

由图4可知:主梁纵漂对斜拉索索力有一定的影响,当主梁往江侧发生52.4 mm的纵漂时,边跨索力下降较大,最大下降了一162.9 kN,中跨索力下降较小,最大下降了一25.6 kN。

在铺装桥面系与主跨汽车荷载工况,主梁往岸侧发生纵漂,在荷载作用与主梁纵漂共同作用下边跨索力与中跨索力均增大,其中中跨索力的增大值大于边跨索力的增大值。

当考虑支座摩擦力时,主梁纵漂减小,对斜拉索索力的影响也随之减小。考虑支座摩擦力与不考虑支座摩擦力相比,在体系转换工况,对斜拉索索力的最大影响减小了106.8 kN。在铺装桥面系和主跨布置汽车荷载工况,对斜拉索索力的最大影响分别减小了149.6、74.7 kN。可见支座摩擦力对斜拉索索力的计算结果有一定的影响。

3.4 主梁纵漂对主梁应力的影响

通过BDCMS计算分析,得到各工况下主梁各控制截面应力变化值如表3所示。

由表3可知:主梁纵漂对主梁应力影响较小,在体系转换工况,当主梁往江侧发生52.4 mm的纵漂时,主梁钢箱梁应力的最大影响量为4.7 MPa。

表3 江湾大桥主梁控制截面上、下缘应力 MPa

项目		不考虑支座摩擦			考虑支座摩擦		
		体系转换	铺装桥面系	主跨汽车荷载	体系转换	铺装桥面系	主跨汽车荷载
14#墩墩顶	上缘	0.6	0.1	0	0.7	0	0.1
	下缘	-0.1	0	-0.1	-0.2	0	-0.1
边跨跨中截面	上缘	0.3	0.2	0.6	0.4	-0.1	0.5
	下缘	-1.1	0.1	0.3	-1.0	-0.1	0.2



续表 3

项目		不考虑支座摩擦			考虑支座摩擦		
		体系转换	铺装桥面系	主跨汽车荷载	体系转换	铺装桥面系	主跨汽车荷载
15# 墩墩顶	上缘	0	0	0	0	0	0
	下缘	-0.6	0.1	1.5	-0.2	-0.5	1.2
次边跨跨中截面	上缘	-4.7	-3.1	3.9	-3.2	-5.3	2.6
	下缘	4.7	-4.2	-11.6	1.2	0.6	-8.8
16# 墩墩顶	上缘	1.1	18.7	6.8	1.8	17.6	6.3
	下缘	-1.5	-30.3	-13.2	-2.2	-29.1	-12.8
主跨跨中截面	上缘	1.1	-19.2	-15.3	0.2	-17.4	-14.4
	下缘	-1.2	22.8	18.7	-0.1	20.2	17.5
17# 墩墩顶	上缘	0	0	0	0	0	0
	下缘	0	0	0	0	0	0

当考虑支座摩擦力时,主梁纵漂减小,对主梁应力的影响也随之减小。但由于主梁纵漂对主梁应力的影响较小,所以考虑支座摩擦力与不考虑支座摩擦力相比,对主梁应力的计算结果影响并不大。

4 结 论

以江湾大桥为例,对大跨度独塔斜拉桥的主梁纵漂影响进行了计算分析,得到以下结论:

- (1) 主梁纵漂对索塔塔顶偏位影响较大,对主梁标高和索力均有一定的影响,对主梁应力影响较小。
- (2) 塔顶偏位的方向与主梁纵漂的方向相同;当主梁往江侧发生纵漂时,中跨主梁上拱,边跨主梁下挠;反之当主梁往岸侧发生纵漂时,中跨主梁下挠,边跨主梁上拱,该计算结果会影响主梁的累积竖向位移,进而影响主梁的无应力制造线形,最终对主梁的成桥标高带来影响。
- (3) 支座摩擦力对主梁纵漂有较大影响,考虑支座摩擦力后主梁的纵漂大为减小。通用有限元程序一般都是按理想支座来考虑,没有考虑支座摩擦力,这样会使主梁纵漂计算结果产生较大的误差,最终使塔偏的计算结果严重失真,使标高和索力的计算结果产生较大的误差。

参考文献:

[1] 于晓东. 海南文昌清澜大桥设计及结构受力分析研究[D]. 大连:大连理工大学,2014.

[2] 施洲,姜兴洪,高贵,等. 高铁大跨度混合梁斜拉桥钢-混结合段受力特性分析[J]. 桥梁建设,2021,35(2):1-4.

[3] 陈开利,余天庆,习刚. 混合梁斜拉桥的发展与展望[J]. 桥梁建设,2005,19(2):54-60.

[4] 涂光亚,李辉,李亮辉. 超大跨度混合梁斜拉桥中跨合龙温度影响及对策[J]. 中外公路,2020,40(1):61-64.

[5] 张录斌. 非对称混合梁斜拉桥静动力学性能研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2019.

[6] 黄梁. 基于弹性索和摩擦摆支座的纵飘桥梁振动控制研究[D]. 长沙:中南大学,2014.

[7] 李立峰,刘本永,张晨熙,等. 中等跨径斜拉桥塔梁弹性约束装置的减震效应研究[J]. 地震工程与工程振动,2013,33(1):146-152.

[8] 颜东煌,张劲超,涂光亚,等. 鄂黄长江大桥静载作用下支座摩擦系数的识别及影响[C]. 中国公路学会桥梁和结构工程学会 2003 年全国桥梁学术会议论文集,2003.

[9] 张惠勤,高建军,吕长荣. 支座纵向摩阻力对济南黄河三桥受力性能的影响[J]. 山东大学学报(工学版),2009,39(4):155-158.

[10] 彭志苗,曹旭华,陈伟. 江湾大桥总体设计[J]. 城市道桥与防洪,2018(9):26-30,8.