

# 强台风下曲线现浇箱梁移动模架设计及施工关键技术

华勇, 黄鹏, 胡伟邦\*, 陈诚

(中交第二航务工程局有限公司, 湖北 武汉 430000)

**摘要:** 针对海南海口铺前大桥强台风条件下曲线现浇箱梁移动模架结构抗风分析, 研发了横梁分组开合结构移动模架。通过移动模架过跨时部分横梁保持连接状态增强了结构抗风稳定性; 横梁在主梁上方可横向移动减小了墩身上部较宽时移动模架主梁横移量, 改善了托架受力。在施工方面, 经过工艺创新, 解决了曲线箱梁移动模架过跨的难题。

**关键词:** 强台风; 曲线; 移动模架; 设计与施工

移动模架作为一种大型施工装备, 适应不同墩高不同地形的现浇箱梁施工。在施工环境、边界条件复杂的情况下, 如台风多发环境、平曲线及空间限制时, 对移动模架的结构设计与施工提出了新要求。通常, 移动模架设计时风荷载不作为结构形式的主要考虑因素, 而在台风多发区的跨海桥梁施工时, 为使移动模架满足施工期抗风要求, 需研究风荷载对移动模架稳定性的影响。在应对曲线箱梁施工时这种特定的抗风结构的施工难度也相应增加, 所以在结构设计时需综合考虑选用合理的结构形式。

## 1 工程概况

### 1.1 现浇箱梁概况

海南海口铺前大桥文昌侧引桥上部结构为左右双幅单箱双室现浇连续箱梁, 其中1~3联桥跨布置为 $4 \times 30$  m, 分为 $(66+54)$  m两个节段浇筑; 4~6联为 $5 \times 30$  m, 分为 $(66+60+24)$  m 3个节段浇筑, 平曲线半径为1 200 m。墩身为花瓶形(图1), 墩顶宽度9.8 m, 左右幅墩身净间距6.45 m, 最大墩高35 m。

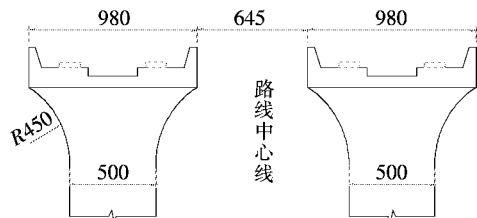


图1 墩身一般构造图(单位:cm)

### 1.2 风环境

铺前大桥项目位于威马逊17级超强台风登陆区, 设计基本风速49.5 m/s, 为目前中国桥梁设计最大风速。4~10月均可出现10级以上大风, 年最大风速约25 m/s, 极大风速41.2 m/s。大于20 m/s的最大风速主要出现在三季度。主导风向随季节转换明显。

## 2 施工重难点分析

针对该工程的施工条件, 移动模架设计及施工存在以下难点:

(1) 强台风环境下移动模架的抗风要求高, 常规的横梁整体开合不能满足施工要求。

(2) 墩身为花瓶形, 上部较宽, 导致过跨时主梁需要横移较大距离方可避开墩身。而左右幅墩身净间距较小, 主梁无法横移较大距离。

(3) 中央分隔带仅0.5 m间隙, 右幅移动模架过跨时受左幅已浇筑箱梁的限制无法开合较大距离。

(4) 现浇箱梁最小平曲线半径为1 200 m, 移动模架需要具备一定的旋转能力, 增加了过跨施工难度。

针对以上重、难点, 需对移动模架抗风设计及曲线过跨两项关键技术进行研究。

## 3 强台风环境移动模架抗风设计

### 3.1 设计基准风速

该项目设计基准风速为49.5 m/s。工程区内大

收稿日期: 2019-12-04(修改稿)

作者简介: 华勇, 男, 高级工程师, E-mail: 71534376@qq.com

\* 通信作者: 胡伟邦, 男, 大学本科, 助理工程师, E-mail: 1223176541@qq.com

风状况下风速随高度的变化呈幂指数规律分布,风切变指数 $=0.155$ 。工程区内阵风系数为 1.31,铺前港的平均海平面高度为 0.3 m。

根据 JTG/T 3360-01-2018《公路桥梁抗风设计规范》,桥梁或构件基准高度  $Z$  处的设计风速按下式计算:

$$U_d = k_f \left( \frac{Z}{10} \right)^{\alpha_0} U_{s10} \quad (1)$$

施工阶段按 20 年一遇的设计风速考虑:

$$U_{sd} = k_{sf} U_d \quad (2)$$

式中: $U_d$ 为桥梁或构件基准高度  $Z$  处的设计基准风速(m/s); $k_f$ 为抗风风险系数; $Z$ 为基准高度,为相对值(m); $\alpha_0$ 为桥址处的地表粗糙系数,海面取 0.12; $U_{s10}$ 为桥梁设计基本风速(m/s); $U_{sd}$ 为施工阶段设计风速(m/s); $k_{sf}$ 为施工期抗风风险系数,取值 0.88。

根据式(1)、(2)得到该项目移动模架施工时设计基准风速(高度 35 m 处 20 年重现期 10 min 平均最大风速)为 50.57 m/s。

### 3.2 移动模架横梁分组开合结构

#### 3.2.1 常规横梁开合方案

移动模架横梁直接承受上部结构荷载,通常位于主梁中部,无法相对主梁横向移动。故在纵移过跨时需要全部打开,避开墩身,开合方式为所有横梁同步开合。这种结构在该项目存在以下问题:

(1) 墩身上部较宽,主梁需横移较大距离方可避开墩身,导致三角托架承受力矩大,不利于精轧螺纹钢受力。

当墩身为柱式墩时,整体开合式移动模架横梁仅需打开墩身宽度  $D$  即可满足纵移要求。该项目墩身为花瓶形,墩顶宽度 9.8 m。如图 2 所示,当墩身顶部较宽时,则移动模架需要横移较大的距离才能避开墩身,而这对牛腿结构的受力非常不利,且该项目左右幅墩身距离较小(6.45 m),整体开合距离受限。

(2) 横梁整体开合,抗风稳定性差,不适用于强台风地域施工。

整体开合式移动模架两侧主梁及相连的横梁和模板为单独的两组结构(图 2)。为了保证移动模架过孔安全,一般配重应保证单侧结构横向整体稳定性大于 1.5。纵移时对风速有严格要求,6 级风以下方可纵移过跨。

该项目由于位于强台风区,施工周期较长,若采取横梁同步开合的方案,突发强对流天气对移动模架过跨期间安全造成不利影响,为增加整体结构的稳定性,

同时保证过跨时尽量减小主梁横移距离,研究横梁分组开合的方案,主梁纵移时保证部分横梁连接,横梁通过主梁上的垫梁滑道横向移动,避开墩身,减小主梁打开的距离。

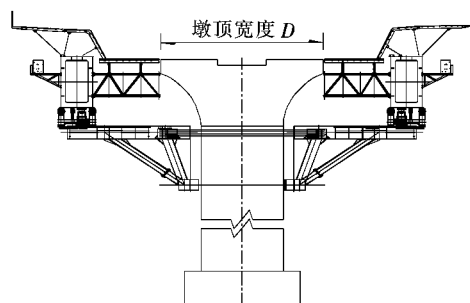


图 2 横梁整体开合

#### 3.2.2 横梁分组开合技术

文昌侧引桥墩身为花瓶形,上部宽度 9.8 m,如果横梁的开合方式采用单侧整体开合,必将引起移动模架横向稳定性的不足,为解决该问题,必须探讨一种新的横梁开合方式。

针对该工程难点,移动模架结构设计时通过以下方案解决:

(1) 横梁设置在主梁上方,主梁与横梁采用插销进行铰接连接,横梁相对主梁可以横向移动,减小纵移过跨时主梁的横移量。线路中心线与外侧设置不等长横梁,解决左右幅墩身净间距不足的问题。考虑左右侧不等长横梁打开时由于悬臂结构不利于结构稳定,故一次只打开部分横梁,保证了结构整体性。

(2) 移动模架纵移时横梁需要打开避开墩身,而两侧横梁打开后悬臂较长主梁倾覆力矩较大,因此此移动模架的设计思路是采用横梁分组开合的方式,过跨时保持部分横梁为连接状态(图 3)。经过计算在不需配重的情况下能够满足稳定性要求。

如图 4 所示,横梁位于主梁上方,通过固定在主梁滑移支座上的千斤顶的收缩和顶推实现横梁的横向移动。同时,滑移支座设置反扣板限制横梁悬臂状态的竖向转动。纵移过跨时通过横梁的横移避开墩身,极大地减少了主梁横移量,有利于三角托架受力。

### 3.3 抗倾覆稳定性分析

#### (1) 常规整体开合(图 5)

倾覆力矩主要为风载荷产生(按 8 级风压值计算),倾覆产生的力矩  $M_w = 2\ 029.75\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 。稳定力矩由自重产生,稳定力矩  $M_g = 3\ 156.95\ \text{kN} \cdot \text{m}$ 。

$$\text{横向抗倾覆稳定系数 } n = \frac{M_g}{M_w} = 1.56。$$

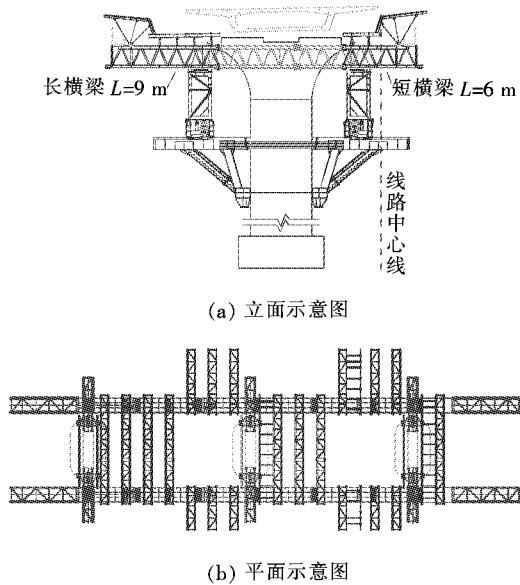


图 3 横梁分组开合

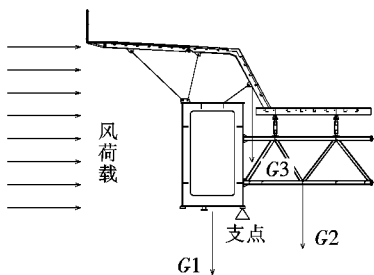
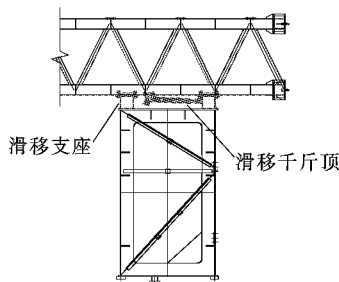


图 5 整体开合式移动模架开模行走稳定性计算

(2) 分组开合移动模架抗风稳定性(图 6)

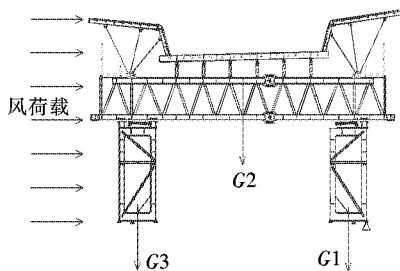


图 6 分组开合式移动模架开模行走稳定性计算

由于分组开合式移动模架过跨时不需要整体打开,计算稳定性时两侧主梁通过横梁连接为整体。

倾覆力矩为风载荷产生(按 8 级风压值计算),倾覆产生的力矩 $M_w=3\,493\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。稳定力矩由自重产生,稳定力矩 $M_q=4.43\times 10^4\text{ kN}\cdot\text{m}$ 。

$$\text{横向抗倾覆稳定系数 } n = \frac{M_q}{M_w} = 12.68.$$

通过对比可知,分组开合结构形式移动模架抗倾覆稳定性远高于整体开合式。

### 3.4 移动模架动力特性分析

采用大型通用软件 Ansys 对结构的动力特性进行分析,其中主梁、横梁和导梁采用 Beam188 单元模拟,对移动模架的主体结构按实际工作情况适当简化处理,对移动模架的主梁、横梁和导梁分别单独计算分析。

在 Ansys 中进行模态分析,计算主梁、横梁和导梁的前 10 阶振型,结果如表 1 所示。

表 1 主梁、横梁和导梁动力特性

阶次	振型主要特征	主梁和横梁		导梁	
		自振频率/Hz	自振周期/s	自振频率/Hz	自振周期/s
1	纯横弯	1.893 5	0.528 1	3.472 4	0.288 0
2	纯竖弯	3.803 5	0.262 9	5.376 2	0.186 0
3	纯扭转	4.279 0	0.233 7	9.590 4	0.104 3
4	纯横弯	4.396 8	0.227 4	13.185 0	0.075 8
5	纯横弯	6.836 2	0.146 2	18.375 0	0.054 4
6	纯横弯	6.877 7	0.145 4	24.829 0	0.040 3
7	纯横弯	6.895 3	0.145 1	26.563 0	0.039 1
8	纯横弯	6.901 7	0.144 9	35.723 0	0.028 0
9	纯横弯	6.903 2	0.144 8	37.031 0	0.027 0
10	纯横弯	6.903 9	0.144 8	40.068 0	0.025 0
扭转频率比值		$f_3/f_2=1.13$		$f_3/f_2=1.78$	

由表 1 可知:主梁和横梁、导梁的结构扭转频率比值都大于 1,颤振形态矢量不断向扭转自由度轴偏移,表明竖向自由度的参与程度不断降低,颤振的发生过程中扭转和竖向自由度的耦合程度也不断减弱。因此,移动模架不易发生颤振失稳现象。

### 3.5 移动模架颤振稳定性分析

根据 JTG/T 3360-01-2018《公路桥涵抗风设计规范》,施工阶段结构或构件的颤振稳定性按式(3)检验:

$$U_f > \gamma_f \gamma_i \gamma_a U_{sd} \quad (3)$$

式中:  $U_f$  为桥梁或构件施工阶段的颤振临界风速 (m/s);  $\gamma_f$  为颤振稳定性分项系数, 该项目取 1.4;  $\gamma_t$  为风速脉动空间影响分项系数, 该项目取 1.3;  $\gamma_a$  为攻角效应分项系数, 取 1.0;  $U_{sd}$  为构件基准高度处施工阶段的设计风速 (m/s), 取 50.57 m/s。

计算得颤振临界风速:

主梁的颤振临界风速:  $U_f = 7.5 f_t B_h = 7.5 \times 4.279 \times 11 = 353 \text{ m/s} > 92.365 \text{ m/s}$

导梁的颤振临界风速:  $U_f = 7.5 f_t B_h = 7.5 \times 9.590 \times 4 \times 2 = 143.856 \text{ m/s} > 92.365 \text{ m/s}$

### 3.6 移动模架非线性静风稳定性分析

依据科研单位风洞试验所测移动模架静力三分系数, 在综合考虑静风荷载非线性、结构几何非线性基础上, 采用有限元软件 Ansys 对移动模架进行非线性静风稳定性全过程分析, 得出静风失稳临界风速。有限元模型与动力特性模型相同, 但此处要对结构进行循环加载, 直至结构扭转产生的三分力系数变化, 导致荷载不断变化直至变形不断增大出现失稳现象。

当荷载施加到 100 m/s 时, 移动模架的导梁出现横向失稳, 结构不再收敛, 达到极限状态, 移动模架横向、竖向位移云图如图 7、8 所示, 整体应力云图见图 9。

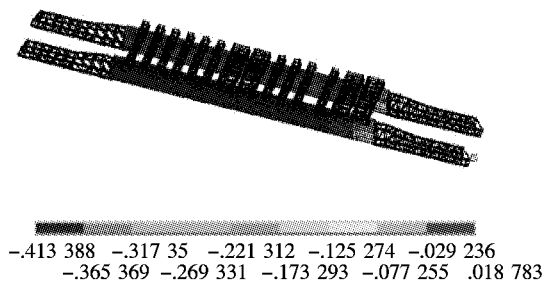


图 7 移动模架横向位移云图(单位:m)

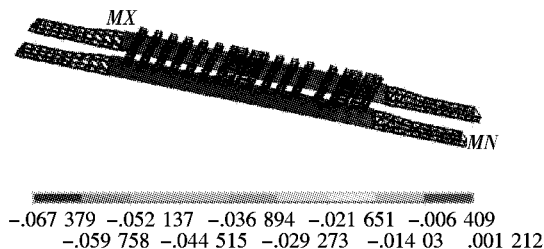


图 8 移动模架竖向位移云图(单位:m)

由计算结果可知: 移动模架横向临界失稳风速为 100 m/s, 移动模架非线性静风稳定性满足要求。当达到极限风速时, 移动模架横向最大变形为 -0.42 m, 发生在前导梁前端点处, 竖直方向最大变形为 0.07 m,

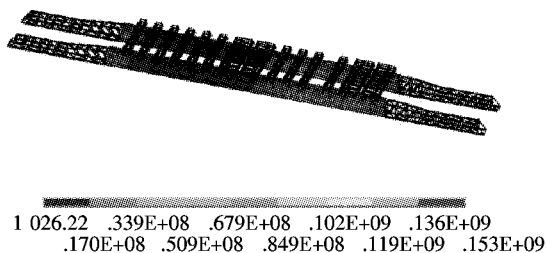


图 9 移动模架整体应力云图(单位:Pa)

发生在前导梁前端, 整体结构最大应力为 153 MPa, 发生在前导梁位置。

通过以上分析, 分组开合式移动模架能够满足设计基准风速 50.57 m/s 的施工要求。

## 4 分组开合移动模架曲线过跨施工技术研究

### 4.1 常规曲线箱梁施工

常规的横梁整体开合式移动模架过跨时横梁与主梁同时开合, 两侧主梁相对独立, 导梁与主梁采用铰接连接, 通过导梁与主梁之间的旋转机构使导梁向曲线内侧偏转一定角度, 调整纵移过跨时的平面偏位(图 10)。

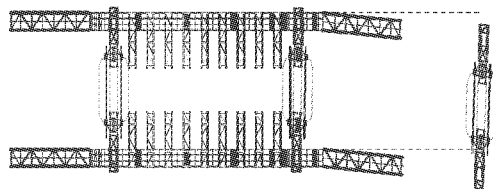


图 10 导梁旋转示意图

### 4.2 分组开合式移动模架曲线过跨方式

横梁分组开合式移动模架在纵移过跨时部分横梁仍保持连接状态, 使得两侧主梁纵移及调整偏位时必须保持高度同步, 避免主梁与横梁产生扭矩, 当主梁与导梁之间存在夹角, 沿导梁方向前进时主梁会向曲线内侧偏移, 导致横梁与墩身产生干扰。该项目移动模架通过技术改进, 使台车与滑架之间可以旋转一定角度, 通过前后墩台车同步反向横移多次调整移动模架轴线, 实现了分组开合式移动模架曲线过跨。

步骤 1: 打开部分横梁。制梁完成后, 卸落主千斤顶, 打开部分横梁, 如图 11 所示。

步骤 2: 纵移 15 m。利用前墩纵移油缸将移动模架向前推进 15 m, 油缸每次步进 700 mm(图 12)。

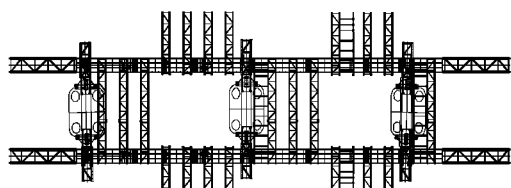


图 11 横梁分组开合

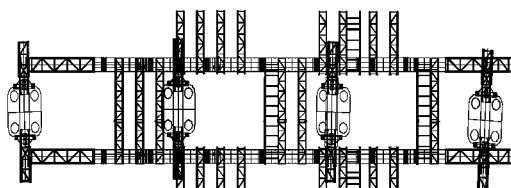


图 12 移动模架整体纵移

步骤 3:合横梁,调整移动模架轴线。前导梁前移至  $n+3$  号墩,且后导梁脱离  $n$  号墩墩旁托架后,以  $n+2$  号墩为转点, $n+1$  号墩两套支承台车同步向线路中心外侧横移; $n+3$  号墩两套台车同时同步向线路中心内侧横移(图 13)。

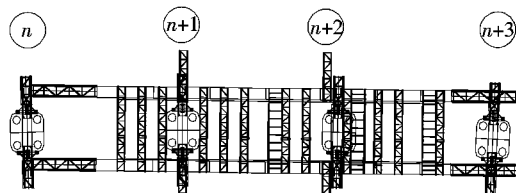


图 13 轴线调整

轴线调整完成后完成首个横梁开合循环,移动模架纵移 60 m 总共经过 4 次开合循环达到制梁位置。

## 5 结论

通过对海南铺前大桥强台风小曲率半径现浇箱梁移动模架设计及施工方面的系统研究,在保证工程顺利实施的前提下,得出以下结论:

(1) 针对横梁整体开合和分组开合两种形式的移动模架抗倾覆稳定性进行分析,前者虽达到规范要求

但没有富余量,难以保证强台风区施工安全。

(2) 研发了分组开合式移动模架,通过纵移过跨时保持部分横梁为连接状态,增强了移动模架纵移过跨时的稳定性,考虑作业人员高空施工,移动模架可在不大于 7 级风况条件下正常作业。

(3) 通过横梁相对主梁可以横向移动的设计,减小了纵移过跨时主梁的横移量,改善了三角托架受力;通过两侧横梁不等长设计,解决左右幅墩身净间距不足的问题。

(4) 经过技术改进,使台车与滑架之间可以旋转一定角度,纵移时前后墩台车同步反向横移对移动模架轴线进行多次调整,使移动模架沿圆曲线的切线方向移动,使移动模架既能满足抗风要求,又能实现曲线过跨。

## 参考文献:

- [1] 胡庆安,乔云强,刘健新.MSS62.5 移动模架造桥机风洞试验及抗风分析[J].筑路机械与施工机械化,2006(10).
- [2] 闫永伦,曾耀,张伟.大跨径移动模架造桥机风洞试验研究[J].公路,2007(8).
- [3] JTG/T 3360-01-2018 公路桥梁抗风设计规范[S].
- [4] 曹淑学,皮军云.跨海大桥混凝土箱梁移动模架施工技术[J].中外公路,2019(4).
- [5] 许宏伟,孙志星,李义强.移动模架造桥机在桥梁施工中的应用[J].筑路机械与施工机械化,2008(8).
- [6] JTG/T F50-2011 公路桥涵施工技术规范[S].
- [7] 王晓乾,周焕涛,杨红光.大跨径、小半径曲线滑移模架的施工技术应用[J].公路交通科技,2010(S1).
- [8] 段东旭,田加法.海湾大桥移动模架现浇梁施工技术[J].筑路机械与施工机械化,2011(9).
- [9] 崔守远,高志玉,严少发.山岭地区移动模架施工关键技术研究[J].施工技术,2018(S1).
- [10] 李传习,柯璐,陈卓异,等.移动模架施工 PC 箱梁底板裂缝成因分析与对策研究[J].中外公路,2015(5).
- [11] 常诚.现浇箱梁横向分布调整系数的实体有限元计算研究[J].中外公路,2018(5).