

## 风荷载作用下斜拉桥悬臂施工力学性能分析\*

王达, 李龙阁, 刘旺

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

**摘要:** 砼斜拉桥在大悬臂施工过程中其变形及结构稳定性难以控制, 尤其对于跨海湾的特大桥梁, 在极端风荷载作用下更突出。文中以广东水东湾大跨度砼斜拉桥为工程背景, 根据其主桥结构特点及当地台风情况确定临时墩设置原则; 建立全桥精细化模型, 对大悬臂状况下台风作用下边跨临时墩设置前后主梁和索塔的应力及位移进行分析, 研究砼主梁及索塔的抗风安全性能。

**关键词:** 桥梁; 斜拉桥; 悬臂施工; 风荷载; 主梁; 主塔; 应力; 位移

中图分类号: U441

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2020)04-0097-04

斜拉桥具有跨越能力大、受力合理等特点, 被大量用于跨河跨海桥梁建设中。跨海大跨度桥梁的地理环境及自然气候较复杂, 对施工进度及安全性有重大影响, 其中台风的影响更显著, 在大悬臂状况下受风荷载影响桥梁很可能产生受力破坏甚至失稳, 需采取抗风安全措施。华强等通过桥塔每侧设 2 对下拉索+电涡流摆式 TMD 抗风措施来提高斜拉桥的抗风稳定性; 张新军等通过增大地锚段主梁长度及边跨设置辅助墩来减小主梁位移, 进而增强其抗风稳定性; 李宗平通过增设临时墩来提高斜拉桥的抗风稳定性。目前大跨度桥梁在风荷载作用下一般采取增设临时墩的方法减小最大悬臂长度, 提高桥梁的抗风安全性能。该文以广东水东湾跨海斜拉桥为工程背景, 对主桥边跨设与不设临时墩两种工况

进行仿真分析, 研究在最大悬臂状况下受台风影响时临时墩对其抗风安全性能的影响, 验算结构在最不利荷载组合下的应力及位移。

## 1 工程概况

水东湾跨海特大桥全长约 3.333 km, 按公路—I 级标准设计, 双向六车道。主桥总长 628 m, 跨径布置为 150 m+328 m+150 m, 采用双塔双索面预应力砼梁半漂浮体系。在索塔处, 主梁竖向设置 2 个双向活动支座, 并在主梁和塔柱之间设置横向抗风支座; 在每侧过渡墩处, 主梁竖向设置 1 个双向活动支座和 1 个单向活动支座。为提高结构的动力性能, 在每个塔梁连接处设置 2 套纵向限位阻尼器, 全桥共 4 套纵向限位阻尼器。主桥立面布置见图 1。

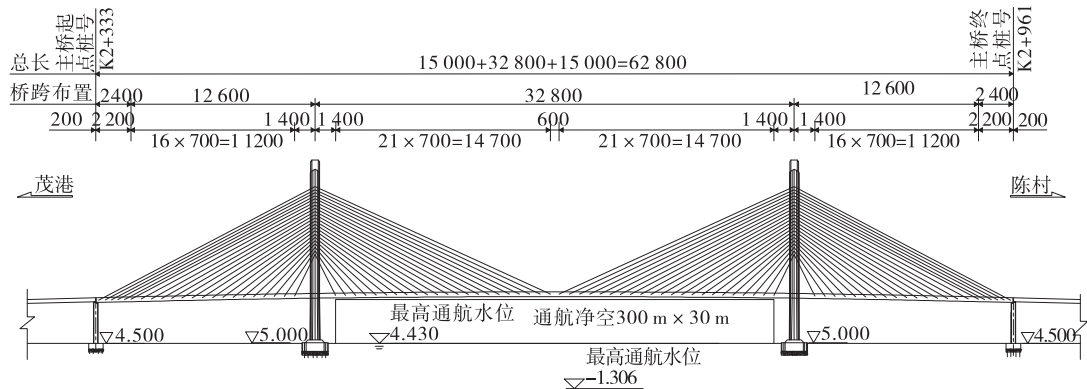


图 1 水东湾大桥主桥立面布置(单位: 高程为 m, 其他为 cm)

主梁采用 PK 断面预应力砼, C55 砼, 其横断面见图 2。斜拉索采用高强平行钢丝拉索, 其抗拉标准强度为 1 770 MPa, 梁端斜拉索索距有 7 和 4.4 m

两种, 标准节段长 7 m, 边跨现浇段长 27 m, 中跨合龙段及边跨合龙段长均为 2 m。主梁中心线处梁高 3.2 m, 边箱底板宽 8.9 m, 中间桥面板宽 18 m, 全宽

\* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51878072)

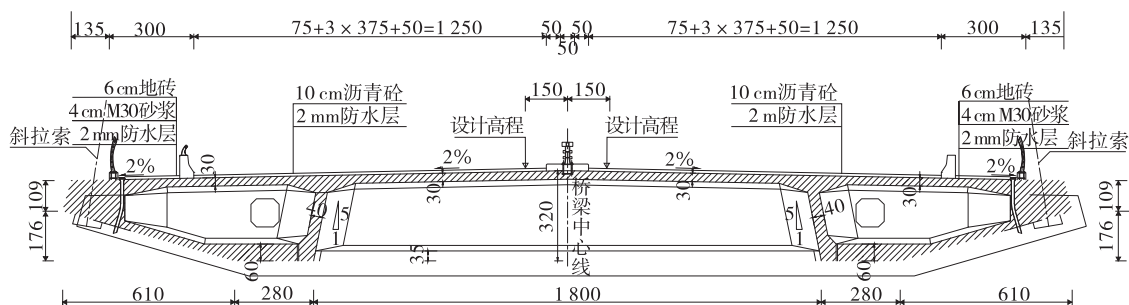


图2 水东湾大桥主梁横断面(单位:高程为m,其他为cm)

35.8 m。横桥向主梁底板水平,桥面设2%双向横坡。标准横断面顶板厚30 cm,水平底板厚60 cm,斜底板厚28 cm,中腹板厚40 cm。采用前支点挂篮悬浇,在边跨合龙前的大悬臂施工阶段处于台风期,为保证施工安全,在边跨处设置临时墩。

## 2 临时墩设置原则及目的

在大跨径斜拉桥悬臂施工过程中,由于索塔两侧的主梁在悬臂浇筑或吊装时间上存在一定偏差,且主梁各截面设计构造尺寸较大,悬浇砼的重量较大,会产生较大的不平衡荷载,使塔梁受到不平衡弯矩的作用。通过塔梁临时锚固的措施可抵抗该不平衡弯矩,使其由塔柱和基础来承受。需注意的是,当双悬臂达到一定长度(150 m以上)时,由于这种不平衡荷载的作用,索塔尤其是索塔根部区域将产生巨大的倾覆力矩,若有落梁及横桥向强风等非正常荷载情况发生,则可能导致塔梁受力破坏特别是索塔结构损害。因此,当桥梁跨径较大,双悬臂浇筑较长,特别是在恶劣环境下施工时,在不影响通航的情况下在主梁的适当位置增设临时墩。在主梁施工过程中,将主梁与临时墩临时锚固,临时墩可约束主梁横向、竖向位移,一旦发生落梁或横桥向强风等突发危险,墩梁锚固对主梁的约束作用可改善塔梁受力状况,进而增强其抗风安全性能。该桥位于水东湾壶口地带,台风来临时受台风影响较大且主梁施工正好达到大悬臂状态,故在主梁边跨12#阶段(距主塔92 m处)增设临时墩。

## 3 风荷载分析

### 3.1 基本风速确定

茂名市电白沿海区域是台风登陆多发区,每年受台风影响约3次,最多一年7次。6—10月台风出现的次数占全年90%以上,其中8—9月最频繁,占全年50%以上,且风速较大,影响范围广。沿海

地区风力大都在9级以上,并伴有大雨或暴雨。分析近几年该地区台风登陆情况,确定主梁需承受的风荷载按施工阶段设计风速取为42 m/s。

### 3.2 主梁风荷载

#### 3.2.1 主梁等效静阵风

根据文献[12],静阵风风速 $U_g$ 按式(1)计算,其值为54.18 m/s。

$$U_g = G_v U_z \quad (1)$$

式中: $G_v$ 为静阵风系数,即考虑地面粗糙度、风荷载加载长度和构件离地高度等因素后的阵风系数,取1.29(A类地表,按较高值取值); $U_z$ 为基准高度 $z$ 处的风速(m/s),施工阶段设计风速取42 m/s。

#### 3.2.2 主梁上静阵风荷载

由于横向风的作用,在主梁上将产生竖向升力,一旦索塔两侧主梁上不平衡升力矩超过索塔的承受能力,主梁将倾覆。根据文献[12],静阵风产生的升举力按式(2)计算。风速为42 m/s时,横向静阵风产生的升举力 $F_v = 0.5 \times 1.25 \times 54.18^2 \times 0.5 \times 35.8 / 1000 = 32.84$  kN/m。

$$F_v = 1/2(\rho U_g^2 C_v B) \quad (2)$$

式中: $F_v$ 为风作用在主梁单位长度上的升举力(N/m); $\rho$ 为空气密度; $C_v$ 为升举系数,根据规范取较大值0.5; $B$ 为桥梁断面宽度。

### 3.3 主塔风荷载

#### 3.3.1 主塔等效静阵风

根据文献[12],静阵风风速按式(3)计算。风速为42 m/s时, $V_g = 1.19 \times 42 = 49.98$  m/s。

$$V_g = G_v V_d \quad (3)$$

式中: $G_v$ 按规范取较大值1.19。

#### 3.3.2 主塔顺桥向等效静阵风荷载

根据文献[12],静阵风荷载按式(4)计算。风速为42 m/s时, $F_g = 0.5 \times 1.25 \times 49.98^2 \times 2.0 \times 700 / 120 = 18.21$  kN/m。

$$F_g = 1/2(\rho V_g^2 C_D A_n) \quad (4)$$

式中: $C_D$ 为构件阻力系数,根据抗风规范取较大值2.0。

## 4 抗风性能计算分析

### 4.1 计算模型

根据文献[12],在悬臂施工阶段需对主梁最大悬臂状态进行分析计算,还应考虑不对称风荷载加载情况,不对称系数取0.5。考虑两种最不利加载工况(见图3、图4)进行计算分析,其中:工况一为不设置临时墩,按最不利情况布载;工况二为设置临时墩,按最不利情况布载。同时应用有限元软件 MIDAS/Civil 建立最大双悬臂状态下三维计算模型(见图5)。

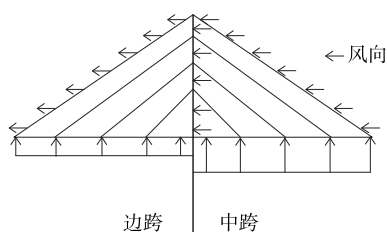


图3 工况一下计算简图

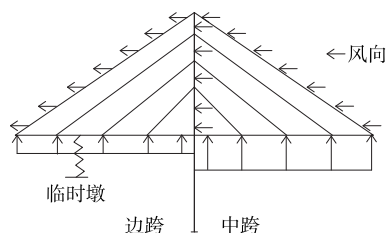


图4 工况二下计算简图

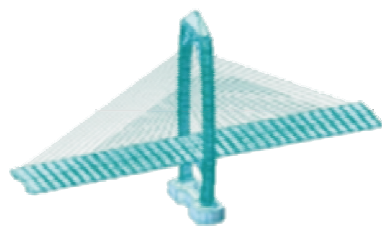


图5 有限元计算模型

### 4.2 计算参数

最大双悬臂状态下,索塔高120 m,悬臂长121 m;索塔材料为C50 砼,主梁为C55 砼,砼容重26 kN/m,挂篮自重3 500 kN,中跨16#块配重1 200 kN,施工阶段设计基准风速为42 m/s。考虑施工阶段荷载(包括自重、预应力、挂篮荷载和压重)和风荷载的共同作用,依据规范要求计算结构位移和应力,计算中不考虑单悬臂挂篮发生掉落的情况。

### 4.3 计算结果分析

工况一未设临时墩,按索塔倾覆最不利情况布载,索塔与主梁截面外缘应力见图6,索塔与主梁位移见图7。由图6可知:索塔塔柱根部砼截面外缘出现拉应力最大值2.58 MPa,大于容许值1.83 MPa;最大压应力为17.3 MPa,小于容许值22.4 MPa。主梁砼截面外缘无拉应力,截面上缘最大压应力为7.75 MPa,小于容许值24.4 MPa。由图7可知:索塔塔顶最大偏位214 mm,边跨主梁最大悬臂端位移为-382 mm,中跨主梁最大悬臂端位移为167 mm(位移以向上为正、向下为负)。

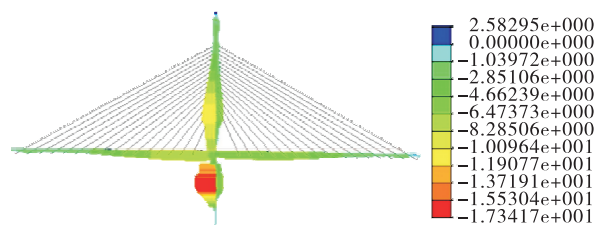


图6 工况一下主梁与索塔砼截面外缘最大应力云图  
(单位:MPa)

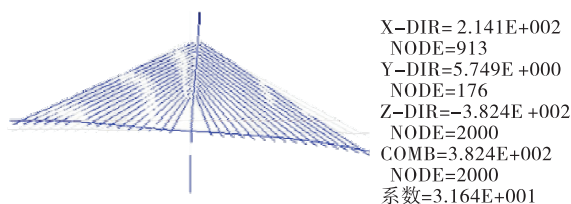


图7 工况一下主梁与索塔位移云图(单位:mm)

工况二设置临时墩,按索塔倾覆最不利情况布载,索塔与主梁截面外缘应力见图8,索塔与主梁位移见图9。由图8可知:索塔塔柱根部砼截面外缘出现拉应力最大值0.54 MPa,小于容许值1.83 MPa;最大压应力为13.3 MPa,小于容许值22.4 MPa。主梁砼截面外缘无拉应力,截面上缘最大压应力为7.07 MPa,小于容许值24.4 MPa。由图9可知:索塔塔顶最大偏位16 mm,边跨主梁悬臂端最大位移为-70 mm,中跨主梁悬臂端最大位移为

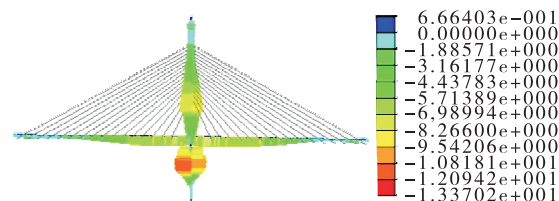


图8 工况二下主梁与索塔砼截面外缘最大应力云图  
(单位:MPa)

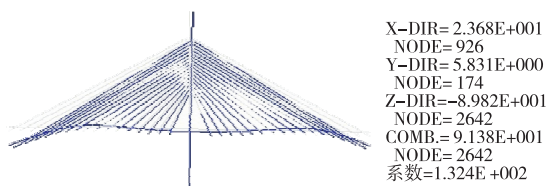


图9 工况一下主梁与索塔位移云图(单位:mm)

—89 mm(位移以向上为正、向下为负)。

表1 两种工况下的应力与位移结果

荷载工况	索塔外缘最大 拉应力/MPa	索塔外缘最大 压应力/MPa	主梁下缘最大 拉应力/MPa	主梁上缘最大 压应力/MPa	主梁边跨悬臂 端位移/mm	主梁中跨悬臂 端位移/mm	索塔塔顶最大 位移/mm
工况一	2.58	17.3	0	7.75	-382	167	214
工况二	0.54	13.3	0	7.07	-70	-89	16

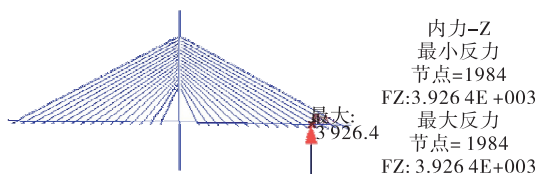


图10 临时墩最大正反力(单位:kN)

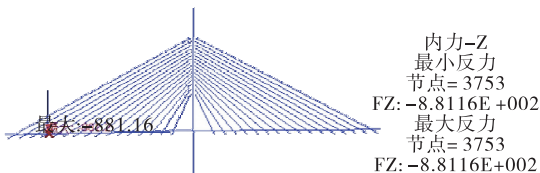


图11 临时墩最大负反力(单位:kN)

## 5 结论

(1) 不设临时墩的情况下,在设计基准风速 42 m/s 作用下,索塔塔柱底部砼截面最大拉应力超过允许值,索塔砼面将出现裂缝,影响桥梁结构的安全性。

(2) 设置临时墩,能减小砼截面外缘应力,在设计基准风速 42 m/s 作用下,砼截面应力小于设计容许值,砼表面不会出现裂缝。

(3) 未设置临时墩时,塔顶偏位最大 214 mm,主梁最大悬臂端位移 382 mm;设置临时墩后,塔顶偏位最大 16 mm,主梁悬臂端最大位移 89 mm。临时墩的设置可减小结构变形,确保结构安全。

## 参考文献:

- [1] 王新忠,周水兴,李峰辉.混凝土斜拉桥发展与展望[J].中国市政工程,2006(2):22-24+91.
- [2] 赵超,孙全胜.台风区连续梁桥最大悬臂状态下抗风性能分析[J].低温建筑技术,2018,40(12):46-49.

两工况下应力和位移计算结果见表 1。

## 4.4 临时墩支承反力

在最大悬臂施工阶段,设计基准风速为 42 m/s,计算得临时墩的支承反力见图 10、图 11(反力以向上为正、向下为负)。由图 10、图 11 可知:在最不利布载情况下,临时墩的最大正反力为 3 926.4 kN(受压),最大负反力为-881.2 kN(抗拔)。

- [3] 张磊.双塔双索面斜拉桥抗风稳定性分析[J].南阳理工学院学报,2013,5(3):70-74.
- [4] ZHANG X J, SUN H L. Study of the aerostatic and aerodynamic stability of super long-span cable-stayed bridges[J]. Engineering Sciences, 2014, 12(2): 82-92.
- [5] 张辉,韩艳,田仲初.大跨度斜拉桥静风稳定性及影响参数分析[J].中外公路,2010,30(3):114-117.
- [6] 华强,丁冬.大跨斜拉桥施工期抗风措施方案研究[J].中外公路,2015,35(4):203-208.
- [7] 张新军,姚美.大跨度部分地锚式斜拉桥抗风稳定性参数研究[J].桥梁建设,2016,46(3):23-28.
- [8] 李宗平.上海长江大桥主桥临时墩设计及施工技术研究[J].桥梁建设,2008,40(4):70-73.
- [9] 张若钢,韩艳,王金权,等.高桩承台连续刚构桥最大悬臂施工阶段风荷载分析[J].山东交通学院学报,2009,17(3):53-57+62.
- [10] 李春光,韩艳,田仲初,等.山区峡谷窄悬索桥静风稳定分析[J].中外公路,2014,34(5):96-99.
- [11] 马婷婷,葛耀君,杨咏昕,等.临时墩对三塔斜拉桥最大双悬臂抖振控制研究[J].华中科技大学学报(自然科学版),2012,40(7):110-114.
- [12] 同济大学.公路桥梁抗风设计规范:JTG/T 3360-01-2018[S].北京:人民交通出版社股份有限公司,2018.
- [13] 康小方,方诗圣,张利,等.静风荷载下的大跨度斜拉桥稳定性分析[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2012,35(5):652-656.
- [14] 刘志文,洪涵,梁立农,等.广东江顺大桥抗风性能试验研究[J].湖南大学学报(自然科学版),2015,42(3):112-119.
- [15] 唐栋梁,罗杨.台风地区独柱索塔半漂浮体系斜拉桥混凝土主梁悬臂施工阶段抗台风稳定性分析[J].西南公路,2017(2):79-84.

收稿日期:2019-08-08