

莫桑比克马普托跨海大桥设计关键技术研究

任蒙, 易蓓, 冯鹏程

(中交第二公路勘察设计院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要:莫桑比克马普托跨海大桥为中国设计施工总承包的非洲大跨桥梁,跨海主桥为主跨 680 m 单跨双铰钢箱梁悬索桥。大桥采用中国规范设计,欧洲规范复核,设计输入参数基于当地资料收集,荷载组合及相应的结构安全度需同时满足中欧两国规范。相较于节段模型风洞试验,全桥气动弹性模型风洞中,扁平钢箱梁表现出了更好的颤振稳定性,其原因是三维颤振中有更多的振型模态参与;在 1 万年重现期,10 min 年均最大风速为 71.54 m/s 的风载作用下,全桥气动弹性模型风洞试验中仍未观测到颤振失稳,颤振稳定性满足要求;在梁底检修车轨道旁设置了导流板,提高涡振安全;为减少静力荷载作用下的位移,采用弹簧—阻尼复合装置替代了传统的阻尼器和柔性中央扣,在桥塔内力增加很少的情况下,限制了静动力作用下的梁体位移,提高了伸缩缝和阻尼器的耐久性。

关键词:马普托大桥;欧洲规范复核;颤振临界风速;地震参数;约束体系;弹簧—阻尼复合装置

1 工程概况

莫桑比克马普托跨海大桥位于非洲东海岸印度洋海湾马普托湾,连接北侧首都马普托市和南侧卡腾贝区,按双向四车道布设,桥宽 25.6 m,设计速度为 80 km/h。莫桑比克马普托跨海大桥为中国在非洲东海岸设计施工总承包的跨海大桥,主桥为主跨 680 m 单跨双铰钢箱梁悬索桥,是目前非洲已建成的最大跨度桥梁。大桥采用中国规范设计,设计理念、材料参数、检验标准、施工工艺和验收标准均基于中国规范和常用作法;但业主要求咨询方同步采用欧洲规范进行复核,即结构受力需同时满足中国规范和欧洲规范相关要求;风载、地震荷载等结构输入荷载基于当地收集资料,通过业主审批后使用。

2 主要建设条件

桥位处海湾面宽约 570 m,水深 8~18 m;最小通航净宽 240 m,净高 60.0 m,桥轴线与航道呈 72.462° 夹角;桥址区域受航空限高影响,近机场侧桥塔处桥面以上不得超过 75.426 m。

桥址区总体属滨海相沉积地貌,主要地层为第四

系覆盖层及第三系半成岩,钻孔深度达到 120 m 时,仍为第三系半成岩。地层分布稳定,地表第四系覆盖层厚 30~60 m,靠近海滨覆盖层更厚,主要包含人工填土、中砂、淤泥层、黏土、圆砾层;第三系岩层包括泥岩、细砂岩、泥质粉砂岩等极软岩,天然湿度抗压强度为 1.46~2.53 MPa。

3 总体设计

桥跨梁底标高受通航净空限制,桥面以上建筑高度受航空限高控制,桥跨受通航净宽和水中基础防撞需求控制,综合考虑,推荐采用主跨 680 m 的悬索桥,一跨跨越湾区域,近机场侧桥塔塔顶距离航空限高 1.94 m。单跨双铰钢箱梁悬索桥,主缆跨度布置为 (260+680+284) m,边中跨比为 0.382/0.418,主缆垂跨比为 1/10。主缆采用 PPWS 法形成,每根主缆有索股 91 根,每根索股由 91 丝抗拉强度为 1 670 MPa 的 5.0 mm 镀锌钢丝组成。全桥横向两根主缆横向间距为 21.88 m。两岸锚碇采用重力式锚碇,圆形地下连续墙基础;主桥平立面布置如图 1 所示。

马普托湾海运方便,加劲梁采用流线形扁平钢箱梁,梁宽(含风嘴)25.6 m,梁高 3.0 m,风嘴夹角为 52.45°(图 2);标准节段长 12.0 m,内部设置 4 道实腹

式横隔板,两侧梁端节段长 15.0 m;加劲梁采用 Q345C,均在中国制造,海运至马普托。正交异性钢桥面板铺装采用 3.5 cm 浇筑式 GA10+3.8 cm 改性沥

青 SMA 铺装结构,其中集料和矿粉采用马普托当地地材;沥青采用中国产出口至现场。

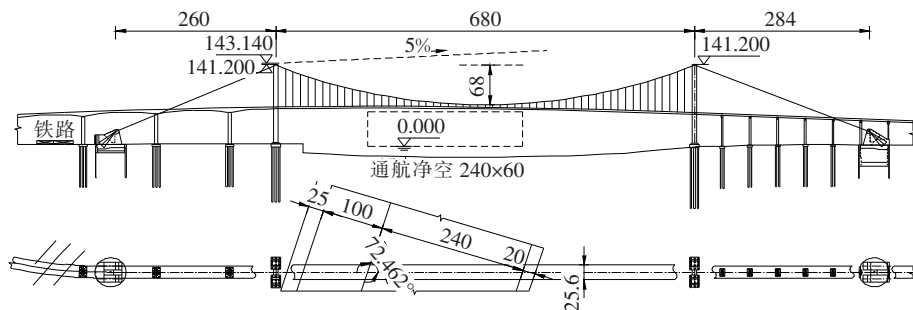


图1 莫桑比克马普托跨海大桥主桥平立面布置(单位:m)

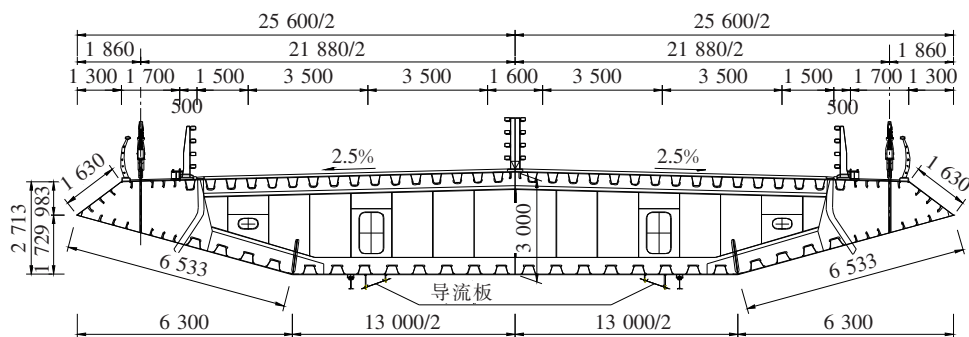


图2 莫桑比克马普托跨海大桥主桥加劲梁横断面(单位:mm)

缆梁连接采用销接式平行钢丝吊索,每一吊点均设置 2 根吊索,每根吊索由 61 丝抗拉强度为 1 670 MPa 的 5.0 mm 镀锌平行钢丝组成。考虑到缆索系统均为中国制造运输至现场,为确保现场安装精度,吊索叉形耳板与锚杯之间的螺纹连接上下两端螺纹方向相反,可通过转动上下两端锚杯与叉形耳板之间的螺纹连接来调整吊杆长度,调节量为 ± 20 mm。

桥塔采用门形框架结构,Maputo 岸塔高为 135.1 m,Katembe 岸塔高为 136.1 m。塔柱均采用矩形空心箱形截面,纵向塔宽 7.0 m,横向塔宽 5.0 m。主塔基础采用 12 根直径 2.2 m 钻孔灌注桩群桩基础,按摩擦桩设计,Maputo 岸侧桩长 90 m,Katembe 岸侧桩长 100 m。混凝土材料采用莫桑比克当地吸水率高于 3% 的粗骨料配制的高性能混凝土。

4 设计关键技术

马普托大桥主桥采用主跨 680 m 的钢箱梁悬索桥方案,主材均采用中国制造,其设计的关键在于大跨柔性结构在非洲东海岸强风、地震等偶然荷载作用下

的结构性能安全;以及动静力作用下悬索桥约束体系的选用。

4.1 桥梁抗风安全

4.1.1 设计风参数

马普托海湾,气象条件复杂,受印度洋季风、飓风影响。莫桑比克国家没有相应的规范给出马普托湾基本风速;马普托海湾靠近南非,南非公路桥梁规范《SATCC 1998 part2》中给出的马普托地区 100 年重现期 10 m 高度处基本风速为 25.0 m/s,对应的 10 min 基本风速为 27.0 m/s。莫桑比克国家气象局提供的马普托市 1973—2010 年的气象统计资料,给出了该市连续 37 年中记录的最大风速为 2001 年的 32.5 m/s。很明显南非规范给出的设计基本风速偏低;基于气象统计资料,采用 Gumbel Type I 极值分布回归计算方法,可计算获得莫桑比克马普托市基本风速——平坦地貌条件下,地面以上 10 m 高度、100 年重现期、10 min 平均年最大风速为 35.77 m/s。

桥梁设计基本风速,还需考虑桥位处地形地貌与标准场地的差异和相应的风剖面幂指数;桥梁跨越马普托湾,两岸为平坦开阔及低层建筑物稀少地区。该

项目采用中国规范设计,但莫桑比克业主要求采用欧洲规范进行相应的校核;桥梁设计基本风速的计算方面欧洲规范与中国规范思路一致,均涉及到地表分类、地表粗糙高度 z_0 、基本风速地表类别转换系数等,只是中国规范中风速剖面采用幂指数描述,欧洲规范采用对数函数描述。

根据中国规范,马普托大桥为 B 类标准场地,相应的地表粗糙度系数为 $\alpha_0=0.16$,地表粗糙高度 $z_0=0.01\text{ m}$,主梁桥面距水面高度取跨中处值 64.0 m ,设计基准风速计算如下:

$$U_d(z) = k_f \left(\frac{z}{10} \right)^{\alpha_0} k_c U_{10} = U_d(64) = 1.0 \times$$

$$\left(\frac{64}{10} \right)^{0.16} \times 1.0 \times 35.77\text{ m/s} = 48.14\text{ m/s}$$

式中: U_{10} 为桥梁所在地区的基本风速(m/s); k_f 为对应不同风险区域的抗风风险系数; k_c 为基本风速地表类别转换系数; z 为主梁的基准高度; α_0 为地表粗糙度系数。

根据欧洲规范 BS EN 1991-1-4,马普托大桥为 II 类标准场地,相应的地表粗糙高度 $z_0=0.05\text{ m}$,地形系数 $C_0(z)$ 为 1.0 ,主梁桥面距水面高度为 64.0 m ,小于梯度风高度值 200 m ,设计基准风速计算如下:

$$V_m(z) = C_r(z) \cdot C_0(z) \cdot v_b = 0.19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,\text{II}}} \right)^{0.07}$$

$$\times \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \times C_0(z) \times v_b = V_m(64) = 0.19 \times 1.0^{0.07} \times$$

$$\ln(64/0.05) \times 1.0 \times 35.77\text{ m/s} = 48.62\text{ m/s}$$

式中: $V_m(z)$ 为设计平均风速,对应中国规范的设计基准风速; v_b 为桥梁所在地区的基本风速(m/s); $C_r(z) = 0.19 \times \left(\frac{z_0}{z_{0,\text{II}}} \right)^{0.07} \times \ln \left(\frac{z}{z_0} \right)$ 为对应不同地表粗糙度的风速高度修正系数,其中 z_0 为对应不同地表类别的粗糙高度, z 为主梁的基准高度。

基于中国规范验算的桥梁设计基准风速为 48.14 m/s ,基于欧洲规范验算的桥梁设计基准风速为 48.62 m/s ,综合考虑,桥梁设计基准风速取 48.62 m/s 。

4.1.2 静风性能

通过节段弹性模型试验, 0° 风攻角作用下,成桥状态主梁三分力系数为:主梁横向力系数为 1.7168 ,竖向力系数为 -0.3385 ,扭转力系数为 0.0214 。加劲梁悬吊在主缆上,索塔与加劲梁之间设置横向抗风支座,横风作用下,加劲梁横向相当于简支梁; 0° 风攻角、 100 年横风作用下加劲梁跨中横向位移达到 2.324

m,挠跨比为 $1/292$ 。为改善横风作用下跨中短吊索弯折变形导致的疲劳影响,在长度小于 20 m 的短吊索与加劲梁连接的销轴处,均设置了关节轴承,关节轴承可实现横向 $\pm 3^\circ$ 转角,实现吊杆销轴处的横向变形。

4.1.3 颤振稳定性

颤振检验风速各国规定并不一致;南非、莫桑比克规范没有相应条文;中国 JTG D60-01-2004《公路桥梁抗风设计规范》中的颤振检验风速考虑了紊流影响,采用 1.2 的安全系数;基于中国规范的马普托大桥颤振检验风速为 54.5 m/s 。英国 BS 5400 规范给出了基于最大风速值和安全系数的颤振检验风速,但欧洲规范倾向于设计者根据经验确定,未给出明确的计算公式。美国《AASHTO LRFD Bridge Design Specifications》3.8.3.3 规定,对于风振稳定性敏感的桥梁,其颤振临界风速为 10 万年重现期的 10 min 的年均最大风速,数值上为 $0.85V(K_z)^{1/2}$ 的基本风速(其中 V 为 3 s 阵风风速, K_z 等同于中国规范的 k_h ,地表类别及风速高度修正系数)。综合中、美规范;马普托大桥采用颤振检验风速为 71.54 m/s 。

基于节段模型的 $+5^\circ$ 风攻角颤振临界风速为 62.1 m/s ,小于颤振检验风速,因此建议在风嘴两边设置各 0.5 m 宽的导流板,提高颤振临界风速;但基于全桥气动弹性模型均匀流风洞试验表明:成桥状态下 0° 风攻角颤振临界风速为 93.6 m/s , $+3^\circ$ 风攻角颤振临界风速为 86.4 m/s ,均大于颤振检验风速 71.54 m/s 。

全桥气动弹性模型试验中未安装基于节段模型风洞试验建议的风嘴导流板,此时桥梁的颤振临界风速仍高于检验风速,其原因是三维颤振中有更多的振型模态参与,且各振型耦合效应明显,而节段模型试验中仅有两个模态参与,且振型相似系数为最不利的 1.0 。因此全桥气弹模型试验获得的颤振临界风速更高,更符合实际状态。

4.1.4 涡振控制

考虑到加劲梁底板设置的工字形检修车轨道易产生旋涡脱落,在检修车轨道内侧设置了导流板,风洞试验中未发现明显的涡激振动现象。

4.2 弹簧—阻尼复合装置约束体系及相应的响应

4.2.1 约束体系

约束体系反映结构传力的路径,马普托大桥竖向约束体系为:钢箱加劲梁通过吊索销接悬吊在主缆上,塔梁交汇处钢箱梁通过纵向滑动的竖向支座支撑于桥塔下横梁。目前大跨度悬索桥纵向普遍使用半漂浮体系,通过跨中设置中央扣索限制汽车制动力作用下缆

梁的相对位移,塔梁连接处设置纵向黏滞阻尼器对地震、脉动风等引起的动力响应提供耗能减震作用。但发生地震作用时,斜向中央短扣索中会产生较大的拉力,使得连接处的主缆和加劲梁产生较大的附加应力;同时随着悬索桥跨度越来越大,汽车活载作用下的附加应力越来越大,导致梁端伸缩缝和阻尼器的静力行程要求也越来越大;有必要优化悬索桥的纵向约束体系,实现在限制静风、汽车等静力荷载作用下加劲梁纵向位移的同时,提供动力荷载作用下的耗能减震作用,提高构件耐久性。莫桑比克马普托大桥在塔梁间采用“弹簧+阻尼”的复合装置,弹簧与阻尼以并联形式工作,同时具备弹性连接装置和阻尼器的特点;静力荷载作用下的缓慢位移,通过弹簧限位;动力荷载作用下,弹簧阻尼器共同发挥作用。达到静力限位,动力耗能的效果。该新型装置回复力 F 与位移 u 的函数关系为:

$$F = K \times u + C \times |\dot{u}|^\alpha \operatorname{sgn}(\dot{u})$$

式中: K 为弹簧刚度; u 为位移; C 为阻尼系数; α 为速度指数; \dot{u} 为瞬时速度。

弹性连接装置通过增加纵向刚度来限制静动力作用下的位移,必然会导致桥塔受力增加;相对于阻尼器在地震荷载作用下不增加桥塔受力,“弹簧—阻尼复合装置”在地震作用下的性能是约束系统的关键点。图3为马普托大桥采用的约束体系。

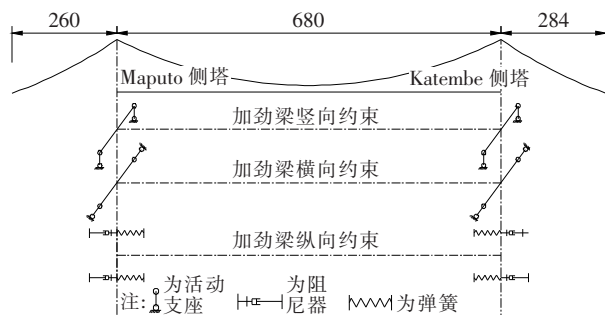


图3 莫桑比克马普托大桥约束体系(单位:m)

4.2.2 地震烈度及地震动输入

莫桑比克国家尚未颁布自己的地震区划图,基于美国USGS的地震记录资料可知,以马普托城市为中心半径150 km范围内,没有大于或等于里氏震级3级的地震记录,距离最近的最大地震记录为2006年于马普托北部500 km外发生了一次M7级地震,GEM发布的报告认为:马普托50年超越概率10%对应475年重现期的地震加速度峰值为0.02g~0.03g,经莫桑比克业主批准,马普托跨海大桥设计地震动加速度峰值取为0.05g,对应于中国Ⅵ度烈度区。

中、欧抗震规范实质上都是两水准设防,两阶段抗震设计;马普托大桥属于重要桥梁,中欧规范均通过重要性系数来调整地震动峰值加速度。欧洲规范重要性系数采用1.3,调整后E2设防水准为1 000年重现期地震,设防目标为不出现局部或整体的倒塌;中国抗震规范A类桥梁E2重要性系数采用1.7,设防水准为2 000年重现期地震,设防目标为经简单修复可正常使用;可见中国桥梁抗震规范的设防水准高于欧洲规范。但欧洲规范规定,汽车活载参与地震动组合,交通量比较大的公路桥梁组合系数一般取为0.2;中国规范中仅提及“需考虑可能同期作用的一定量的可变作用”,但没有相关的组合系数规定。综上所述,对应于马普托大桥,中国规范的抗震水准高于欧洲规范。

采用非线性时程进行地震动分析,地震动时程一组采用2006年发生于莫桑比克的地震动记录调整值,另外两组采用根据反应谱转换的人工地震动时程。

4.2.3 弹簧—阻尼复合装置参数及荷载作用下的桥梁结构响应

弹簧—阻尼复合装置中,阻尼功能属非线性部分;阻尼参数主要通过地震动反应确定,通过非线性时程试算,马普托大桥在每个桥塔处横向设置两个弹簧—阻尼复合装置,单个装置阻尼参数为 $C=1\ 300\ \text{kN} \cdot (\text{s/m})^\alpha$, $\alpha=0.3$ 。弹簧刚度是在阻尼参数确定的基础上,根据结构的纵向位移及内力响应确定,单个复合装置弹簧刚度采用 $K=2\ 500\ \text{kN/m}$ 。

弹簧的存在,不仅会对静力荷载作用下的位移产生约束;而且影响桥梁结构的纵向振动特性(表1)。由表1可见,采用弹簧—阻尼复合装置后,马普托大桥的纵向刚度提高,相应的振动频率提高,周期变短,但纵向1阶振动周期仍较长,属柔性长周期结构。

马普托大桥设计采用纵向漂浮体系、纵向塔梁间设置黏滞阻尼器、纵向塔梁间设置弹簧—阻尼复合装置3种体系进行结构响应对比,其结果如表2所示。由表2可得:相对于黏滞阻尼器,弹簧—阻尼复合装置通过弹簧受力,全面控制了静动力作用下的位移;大桥桥塔受力控制荷载为100年风荷载,在100年纵向风作用下,复合装置仅增加了370 kN纵向受力,复合装置受力导致的桥塔纵向剪力及塔底弯矩,均在桥塔截面承载能力范围内;无需增加桥塔截面及配筋。

图4为马普托大桥弹簧—阻尼复合装置受力时程图。由图4可以看出:在地震动时程作用下,弹簧力和阻尼力达到极值的时间不同步,同时复合装置位移较小,弹簧力远小于阻尼力;弹簧—阻尼复合装置合力反

表 1 马普托大桥采用弹簧—阻尼复合装置后的纵向动力特性改变

| 振型 | 漂浮体系 | | | | 弹簧—阻尼复合装置 | | | |
|------------------|----------|--------|---|---|-----------|--------|---|---|
| | 周期/ s | 质量参与系数 | | | 周期/ s | 质量参与系数 | | |
| | | X | Y | Z | | X | Y | Z |
| 纵向振动及 1 阶竖向反对称振动 | 8.76 | 7.96 | 0 | 0 | 6.97 | 1.19 | 0 | 0 |

表 2 不同纵向约束体系下马普托大桥梁端位移及塔梁连接装置受力

| 项目 | 梁端位移/mm | | | 连接装置受力/kN | |
|---------|-----------|-----------|-----------|-----------|-------------|
| | 漂浮体系 | 阻尼器 | 复合装置 | 阻尼器 | 复合装置 |
| 汽车制动力 | 194(−194) | 194(−194) | 80(−80) | — | 687(−405) |
| 汽车活载 | 421(−399) | 421(−399) | 156(−137) | — | 1 076(−761) |
| 整体温度 | 121(−71) | 121(−71) | 117(−69) | — | 117(−69) |
| 百年纵风 | 184(−184) | 184(−184) | 78(−78) | — | 370(−370) |
| E2 地震作用 | 97(−97) | 35(−35) | 35(−35) | 779(−731) | 739(−699) |

注：表中括号内、外数值分别为节点加劲梁缩短、增长方向位移。

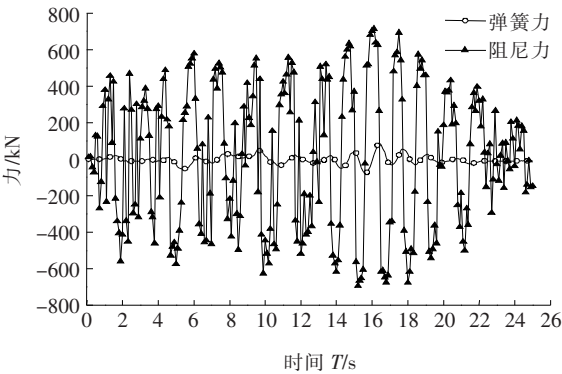


图 4 弹簧—阻尼复合装置受力时程图

而小于阻尼器的受力，未增加地震作用下塔底的内力。

综上所述，马普托大桥采用弹簧—阻尼复合装置，提高了悬索桥的纵向刚度，减小了静力荷载作用下的位移，加劲梁在静载作用下的变形由漂浮体系的 860(−751) mm 调整为 498(−393) mm，减小了伸缩缝型号和阻尼装置在静力荷载作用下的位移行程；同时地震作用下的梁端位移、塔底内力均未增加。

5 结论

莫桑比克马普托跨海大桥为目前非洲建成的最大桥梁；主跨 680 m 悬索桥一跨跨越马普托海湾，避免了水中深基础施工和桥墩防撞设施设置。马普托大桥的设计关键技术为：

(1) 在发展中国家，没有明确的设计基本风速和设防地震烈度的情况下，基于对已有记录资料的数据

分析，明确了桥梁所在区域的基本风速和地震动设计参数；综合中国规范、欧洲规范、美国规范等，确定了桥梁的设计风速和悬索桥颤振检验风速等参数，对中国参与“一带一路”倡议沿线欠发达国家的大跨桥梁设计具有良好的借鉴意义。

(2) 马普托大桥风洞试验表明：基于全桥气动弹性模型试验的颤振检验风速高于节段模型的颤振检验风速，其原因是全桥气动弹性模型中三维颤振有更多的振型模态参与，各振型耦合效应明显；对类似桥梁的风洞试验有较大借鉴作用。

(3) 通过在钢箱加劲梁和桥塔间设置弹簧—阻尼复合装置替代传统的中央扣和阻尼装置，不仅达到了阻尼器的耗能作用，而且控制了汽车荷载、制动力、大风等静力荷载作用下的梁端位移，提高了结构的纵向刚度，相应的桥塔内力并未明显增加；提高了伸缩缝、支座、阻尼等结构构件的耐久性。

该桥于 2014 年 12 月开工建设，2018 年 11 月通车运营，运营以来，经历了热带气旋的考验，结构风振安全；运营过程中加劲梁纵向位移较小，弹簧—阻尼复合装置和伸缩缝运营良好，桥塔受力安全；验证了弹簧—阻尼复合装置在基础覆盖层较厚、地震烈度不高区域的大跨悬索桥中的应用效果。

参考文献：

[1] 周泳涛,冯鹏程,周健,等.莫桑比克马普托大桥主桥桥型方案研究[J].桥梁建设,2013(5).

钢管混凝土拱桥施工过程智能调控

冯春萌, 叶志权, 唐睿楷, 梁厚燃, 解威威*

(广西路桥工程集团有限公司, 广西南宁 530011)

摘要:为了克服传统施工方法中需依靠塔架和风缆强大的刚度控制塔顶水平位移的经济性不佳等问题,该文以来宾马滩红水河特大桥拱肋节段吊装过程为研究背景,采用GNSS自动化监测系统、计算机控制系统以及液压千斤顶组成的全新智能调载控制系统,并根据目标位移实时全天候调控塔顶水平位移。此外,以南岸上游的塔顶水平位移 V_1 为研究对象,对比分析了未调控状态和主动调控状态下的水平偏位,研究得出在“吊、扣塔合一”的塔架拱肋吊装过程中全新控制系统的主动调控具有精度高、稳定性强以及经济性好等优点。

关键词:塔顶水平位移;全新控制系统;主动调控;智能调控

1 引言

随着科学的发展和施工技术的进步,钢管混凝土拱桥从四川旺苍东大桥到主跨为530 m的合江长江一桥,钢管混凝土(Concrete-Filled Steel Tubular, 简记为CFST)拱桥的跨径在不断地突破和刷新,且郑皆连等认为按照现有的施工技术发展水平,有望实现700 m大跨径的CFST拱桥建造。而在大跨和超大跨CFST拱桥拱肋节段吊装施工过程中,塔顶纵向水平位移变化是影响整桥线形的控制因素之一。

塔顶水平位移现存在的问题,对于采用斜拉扣挂悬拼施工的CFST拱桥在拱肋节段吊装与水平运输过程中,会出现诸多不良因素。一方面由于主扣塔产生较大的水平偏位,进而产生一定的力矩,严重影响塔架的稳定性;另一方面,缆索吊装过程中主扣塔随之而动,悬拼精度得不到保证,进一步影响拱肋线形。针对以上问题,传统施工方法常借助大刚度塔架与顶腰风缆使塔顶水平偏位在合理的范围之内,虽能保证施工过程正常进行,但这种被动控制方法存在费用高、实时性差等不足,甚至不能较大限度克服塔顶水平偏位对目标线形的影响。为了消除上述缺陷,较常采用的是

- *****
- [2] 周健,樊泽民,王骑,等.基于节段模型风洞试验的莫桑比克马普托大桥主梁选型研究[J].世界桥梁,2014(2).
- [3] 冯国瀚,陈进昌,雷俊卿.桥塔约束刚度对单跨双缆悬索桥受力特性的影响[J].中外公路,2019(5).
- [4] 徐欣,周国玲.中欧规范桥梁结构风荷载计算方法对比研究[J].中外公路,2019(5).
- [5] 冯鹏程,丁仁军,陈毅明,等.沌口长江大桥总体设计[J].中外公路,2017(6).
- [6] 周健,邹恩杰,李元博,等.莫桑比克马普托大桥锚碇基础方案比选[J].世界桥梁,2012(5).
- [7] 王民,周永涛,尚飞,等.莫桑比克马普托大桥钢桥面铺装力学响应状态分析[J].交通科技,2018(1).
- [8] 万田保.改善桥梁结构耐久性的阻尼器性能要求[J].桥梁建设,2016(4).
- [9] 张琦,徐江,戴国亮,等.马普托大桥南锚碇工程半成岩力学特性试验研究[J].岩石力学与工程学报,2017(10).
- [10] 祝长春,罗建军,赵聪明,等.莫桑比克马普托大桥水文地质特征研究[J].施工技术,2016(45).
- [11] 祝长春,郭常瑞.马普托大桥南锚碇复杂地层超深地下连续墙施工技术[J].施工技术,2016(32).
- [12] 曹冬,石明强,丁少凌.基于欧洲规范马普托大桥总体验算[J].公路交通科技,2018.

收稿日期:2020-12-03(修改稿)

基金项目:国家自然科学基金重点资助项目(编号:51738004);交通运输行业重点科技项目(编号:2018-MS1-003);广西科技重大专项(编号:桂科AA18118055)

作者简介:冯春萌,男,高级工程师。

*通信作者:解威威,男,工程师。E-mail:214395494@qq.com