

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2023.01.021

挪威哈罗格兰德大桥主缆猫道抗风系统 构造与性能研究

王传福, 杨定军

(四川公路桥梁建设集团有限公司, 四川 成都 610072)

摘要: 挪威哈罗格兰德大桥为空间主缆斜索面悬索桥, 在主缆索股安装期间猫道设计为整幅式, 考虑到当地风速很大, 专门为该猫道设计一套抗风系统。文中介绍该猫道抗风系统的构造, 通过有限元计算和风洞试验分析其承载能力、抗风性能, 简述其安装和拆除施工工艺。

关键词: 桥梁; 悬索桥; 主缆; 猫道抗风系统

中图分类号: U442.5

文献标志码: A

文章编号: 1671-2668(2023)01-0107-04

悬索桥多采用平行主缆。挪威哈罗格兰德大桥为主跨为 1 145 m 空间缆斜索面悬索桥, 主缆采用空间线形。安装主缆期间猫道设计为整幅式, 主缆施工完成后将猫道随主缆一起横移成为分离式猫道, 在主塔塔顶和承台设置带调节功能的锚固系统。以往人行用途的悬索桥因桥面窄、宽跨比小, 常设置抗风缆。如 2022 年 5 月捷克共和国建成的人行悬索桥 Sky Bridge721(天空之桥 721), 其跨度为 721 m, 桥面宽 1.2 m, 桥面下方设置抗风缆。而车行用途的悬索桥主缆间距较大, 猫道通常为双幅且宽跨比较大, 整体抗风性能较高, 通常未设置抗风缆。如 2022 年 3 月建成的土耳其 1915 恰纳卡莱大桥, 该悬索桥主跨 2 023 m, 猫道单幅宽度 4.3 m, 猫道双

幅整体宽度 42.8 m, 未设置抗风缆。哈罗格兰德大桥的跨中主缆横向间距为 3 m, 主缆分离之前猫道为宽度 7 m 的整幅结构。该桥横跨挪威北方的峡湾, 桥梁施工期间风速极大, 主缆安装期间整幅式猫道的稳定性极为重要。经过方案对比, 设计一套猫道抗风系统。本文介绍该主缆猫道抗风系统的构造和施工工艺, 分析其承载能力和抗风性能。

1 工程概况

哈罗格兰德大桥位于挪威北部诺兰德郡纳尔维克市, 是欧洲 E6 公路挪威段的一部分。该桥跨越水深 350 m 的罗姆巴肯峡湾, 为主跨 1 145 m 空间缆斜索面钢箱梁悬索桥, 其立面布置见图 1。

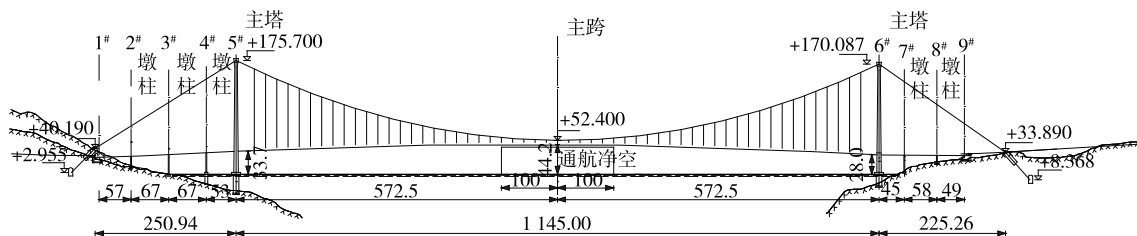


图 1 挪威哈罗格兰德大桥立面图(单位:m)

该桥主塔采用混凝土结构, 基础为混凝土沉井结构, 锚碇为岩锚结构。主缆采用空间线形, 塔顶处主缆间距为 3 m, 跨中处主缆间距 15.646 m。主缆为预制平行钢丝(PPWS)结构, 主梁为流线型钢箱梁结构。吊索为带 HDPE 护套的密封钢丝绳, 主缆、主梁、塔顶、锚碇等部位钢结构采用缠包带+除湿系统防腐体系。

2 猫道抗风系统的构造

2.1 整体构造

哈罗格兰德大桥的猫道在安装主缆期间中跨设计为整幅式截面, 在主缆施工完成后将猫道随主缆一起横移成为分离式猫道。猫道计算跨度为 268.249 m+1 145.000 m+241.959 m, 猫道距离主

缆中心的高度为 1.25~1.75 m,单幅猫道宽度 3.5 m。单幅猫道承重绳采用 $6\phi 54$ mm 镀锌钢绳,扶手绳采用 $2\phi 32$ mm 和 $2\phi 16$ mm 镀锌钢绳。

在猫道抗风系统设计时,针对现场实际情况进行结构优化。抗风系统由抗风主索、抗风吊杆、承台锚固调节装置、门架下横梁连接装置组成。抗风主索共设置两组,每组采用 1 根 $\phi 56$ mm 镀锌钢绳,抗

风主索锚点设置在主塔承台的两侧。在猫道面层与抗风主索之间设置抗风吊杆,抗风吊杆由 $\phi 16$ mm 镀锌钢绳和链条组合构成,每隔 50 m 布置一道,全桥共 22 道。猫道及抗风系统总体布置见图 2。

2.2 抗风吊杆

抗风吊杆设置于猫道门架下横梁两侧,上端通过横梁的锚固耳板与猫道相连。吊杆由链条(用于

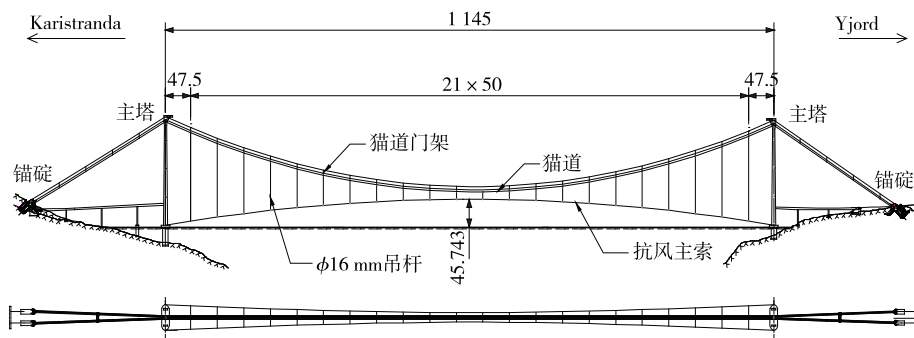


图2 猫道及抗风系统总体布置(单位:m)

调节长度)、直径 16 mm 钢绳、2 个卸扣装配而成,吊杆下端通过夹具与 $\phi 56$ mm 抗风绳相连接(见图 3)。

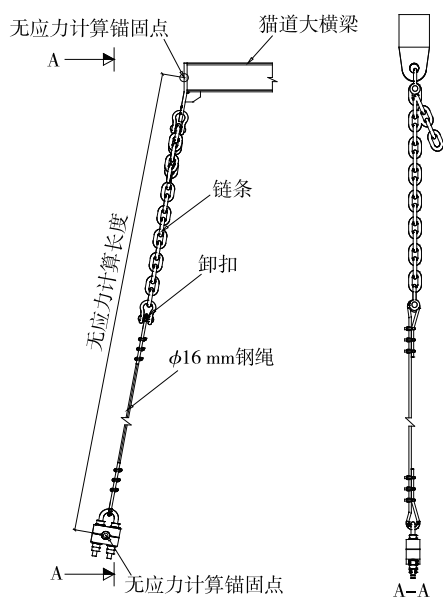


图3 吊杆的布置

2.3 锚固调节装置

抗风绳在承台的锚固调节装置设置有关节轴承和球形垫板,可适应抗风绳在工作期间角度的三维空间变化。承台施工期间提前安装抗风主索的牵引钢绳转向滑车等装置(见图 4 和图 5),所有预埋件均采用德国生产的 DSI_DYWIDAG 系列产品。

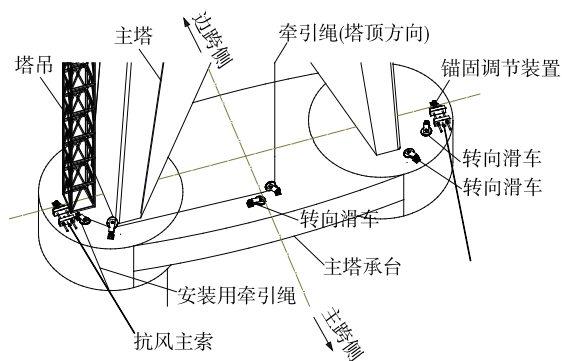


图4 抗风缆锚固调节装置及安装用转向滑车布置

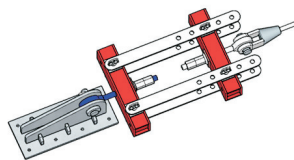


图5 锚固调节装置的构造

3 猫道抗风系统性能分析

3.1 猫道系统承载能力分析

猫道系统设计按照欧洲规范进行,包括 EN 1990:2002《欧洲规范:结构设计基础》^[1]、EN 1993-1-1-2005《欧洲规范 3:钢结构设计第 1-1 部分:一般规定和建筑规定》^[2]、EN 1993-1-11-2006《欧洲规范 3:钢结构设计第 1-11 部分:受拉构件的结构设计》^[3]。承载能力分析采用极

限状态法^[4]。

采用西南交通大学开发的桥梁结构空间静动力非线性分析系统 BNLAS 建立空间有限元模型对猫道及抗风系统进行计算分析,计算分析时考虑空间几何非线性的影响。猫道承重索和门架承重索采用空间悬链线单元进行离散,两侧猫道承重索之间通过横向通道连接,横向通道采用梁单元模拟;门架承重索之间、猫道承重索和门架承重索之间均通过门架连接;中跨门架采用梁单元模拟,边跨门架采用杆单元模拟;抗风吊杆和抗风绳采用杆单元模拟。猫道模型结构与实际猫道结构相符。结构分析模型见图 6 和图 7。

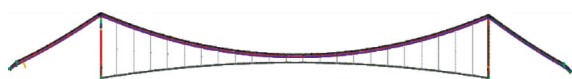


图 6 结构计算整体图

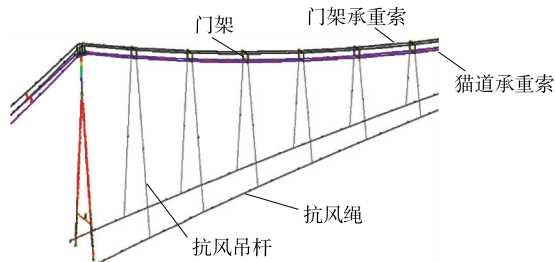


图 7 计算模型构件布置

分析时考虑恒载和活载,恒载包括猫道(含横向通道、变位钢架等)及抗风系统、索股托架、索股牵引系统(猫道门架、承重索等)、配电箱、电缆及照明灯具,活载包括风荷载(风速 $v_b = 28 \text{ m/s}$)、温度变化荷载(基准温度 $+5^\circ\text{C}$,最低温度 -32°C ,最高温度 $+45^\circ\text{C}$)、索股自重、人行荷载、雪荷载、冰荷载。

抗风绳采用强度为 $1\,960 \text{ MPa}$ 的 $6 \times 36 \text{ WS} + \text{IWRC}$ 镀锌钢绳,其他钢绳采用强度为 $1\,870 \text{ MPa}$ 的镀锌钢绳,钢材采用 Q345D 材料。

为确定最优抗风绳直径、抗拉强度和初张力,在整体模型中分别选取 6 种不同直径的钢绳、5 个不同级别的初张力、3 个不同级别的抗拉强度进行组合。共对比分析 60 个荷载组合,最终确定抗风绳直径为 56 mm ,初张力为 90 kN ,抗拉强度 $1\,960 \text{ MPa}$ 。

随后进行结构静力分析,验算猫道结构的承载能力。荷载工况根据 EN 1990:2002 规定的最终极限状态(ULS)和使用极限状态(SLS)分别建立,其中最终极限状态又分为静力平衡校核(EQU)和承载力校核(STR/GEO)。经计算,猫道系统最终极

限状态和使用极限状态下内力均满足规范要求。

3.2 猫道系统抗风性能分析

联合西南交通大学风工程试验研究中心对该桥猫道结构的抗风性能进行研究。先通过风洞试验获得猫道系统的空气静力学系数,再利用 ANSYS 有限元软件分别建立含抗风绳和不含抗风绳两种模型。分析结果显示:在风荷载下减小位移最有效的对策是设置抗风绳;猫道与抗风系统形成的横截面可以提高结构刚度,特别是在横向和扭转方向;有抗风绳猫道的横向位移(见图 8)和扭转角(见图 9)比无抗风绳猫道减少 50%,竖向位移(见图 10)只有无抗风绳猫道的 1/4;当抗风主索初始张力增加时,位移减小比例显著增加,这可能会带来锚固点反力显著增大,抗风系统设计时需在两者之间取得平衡。

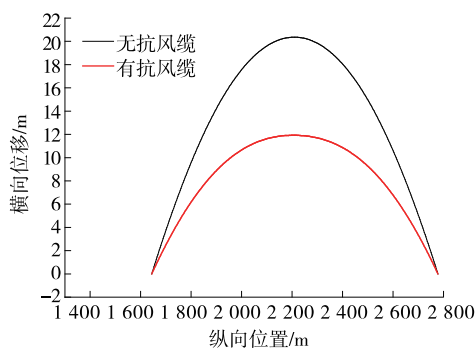


图 8 猫道系统横向位移分布(20 m/s, 0° 攻角)

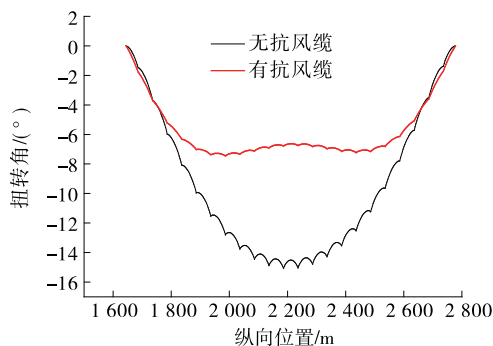


图 9 猫道系统扭转角分布(20 m/s, 0° 攻角)

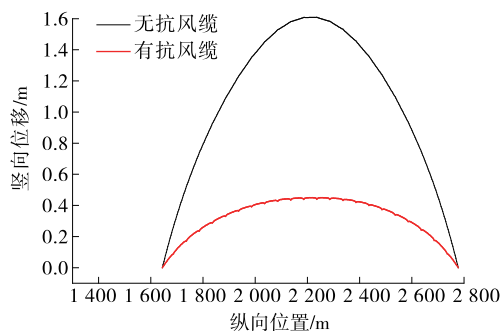


图 10 猫道系统竖向位移分布(20 m/s, 0° 攻角)

4 抗风系统的安装和拆除

哈罗格兰德大桥的猫道和抗风系统构件均在中国加工后运输至现场。在猫道上进行抗风绳和吊杆组拼,然后进行整体下放安装。采用安装方法的逆向操作整体提升至猫道进行拆除。

4.1 抗风系统安装工艺流程(见图 11)

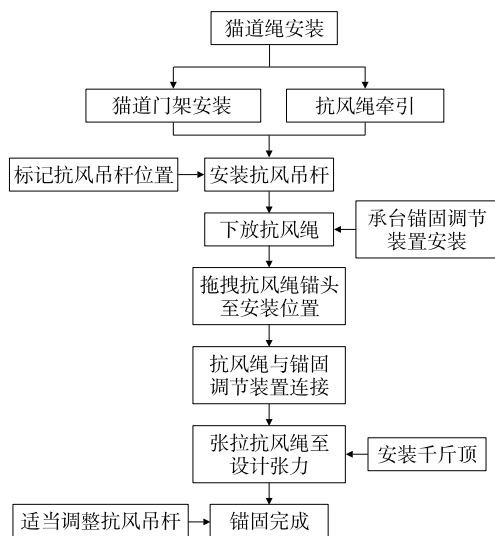


图 11 抗风系统安装工艺流程

4.2 抗风绳和吊杆吊运

抗风绳在运输至现场后放置于一岸主塔的引桥桥面,通过塔顶卷扬机运输至塔顶;随后通过牵引系统牵引至另一岸的主塔塔顶,钢绳支承在猫道托滚上;最后将抗风绳两端与塔顶门架进行临时锚固。使用同样的方法将 $\phi 16$ mm 抗风吊杆运送至猫道对应设计安装位置附近。

4.3 抗风绳和吊杆的组拼与横移

将抗风吊杆上端与猫道对应位置的猫道横梁耳板连接。在抗风绳上按照计算的节点间无应力长度标记出吊杆位置,再将吊杆下端与抗风绳对应标记处连接,完成抗风系统下放前的组拼(见图 12)。

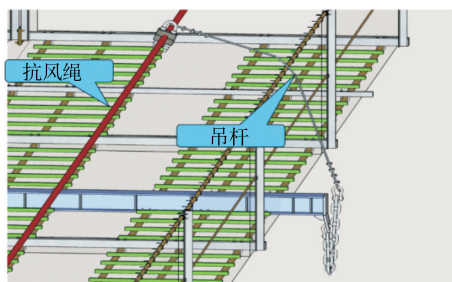


图 12 抗风绳和吊杆在猫道上组拼后示意图

利用主塔塔顶卷扬机将抗风绳提离猫道托滚,

并横移至猫道之外,最后将抗风绳临时锚固在塔顶门架顶部。将所有吊杆通过人工移至猫道外侧,使其处于自由悬垂状态,完成抗风系统整体下放前的准备。

4.4 抗风系统整体下放

以安装在每个主塔塔顶的 4 台 10 t 卷扬机作为牵引和下放设备,单根抗风绳在每个塔顶设置 1 台下放卷扬机、1 台牵引卷扬机。卷扬机钢绳与抗风绳端部接头相连,下放时 4 台卷扬机配合同步收放钢绳,随着抗风绳继续下放,吊杆承受抗风绳的质量,抗风绳的跨中线形转换为上拱线形。抗风系统整体下放布置见图 13。

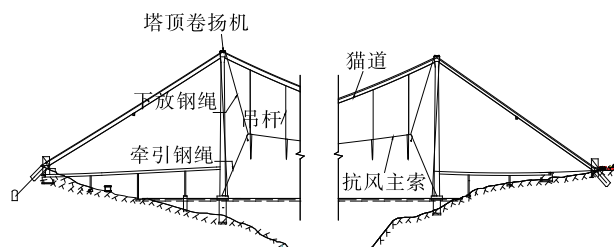


图 13 抗风系统整体下放示意图

当抗风绳锚头下放至承台锚固装置附近时,利用液压千斤顶同步张拉锚固装置,将抗风绳的荷载传递至锚固装置,然后拆除下放和牵引卷扬机的钢绳(见图 14)。

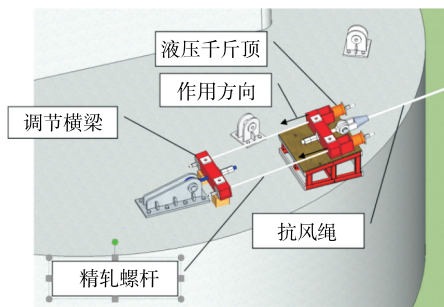


图 14 利用千斤顶张紧抗风绳

4.5 抗风绳施加初张力

利用千斤顶张拉精轧螺栓,使抗风绳达 90 kN 的初始张力,在锚固装置上安装调节钢带。千斤顶卸荷后拆除精轧螺栓,完成锚固调节装置的安装。

4.6 抗风系统的拆除

在猫道改吊至主缆后,进行抗风系统拆除。采用与安装期间相同的卷扬机钢绳与抗风绳连接方式,只是牵引和下放卷扬机的运转方向调换,2 个主塔 4 台卷扬机同步运作,将抗风钢绳收紧,拆除承台

(下转第 115 页)

结果来指导承台温控过程可能造成承台表面开裂;整体等效模型计算的表面峰值拉应力相对偏大,以其计算结果指导承台温控过程能降低承台表面开裂的风险。综上,采用整体等效的方式进行有限元计算来预测承台水化热情况,可偏安全地指导大体积混凝土承台水化热温控过程。

4 结论

(1) 以承台温控的实测温度数据和现场情况为依据,对比承台素混凝土模型和分离式模型的计算结果,表明考虑钢筋作用的分离式模型的计算结果更接近承台温控实际情况,考虑钢筋作用可提高大体积混凝土承台水化热有限元计算结果的可靠性,可根据分离式模型的计算结果更准确地指导承台水化热温控过程。

(2) 通过承台素混凝土模型和分离式模型的计算结果对比分析,在承台水化热过程中考虑钢筋作用,相当于提高了承台的导热性能,降低了承台的比热容,使承台内部热量传递和承台整体散热加快,且提升了承台温度趋于一致的能力,从而减小承台的温度梯度,进而减小因承台各区域温度不同所引起的温度拉应力。

(3) 承台整体等效模型相比于局部等效模型,其计算温度更接近于分离式模型的计算结果,且计算的表面峰值应力相对偏大。采用钢筋整体等效的

简化方法进行大体积混凝土承台水化热有限元分析,其计算结果相对偏安全,且建模分析更方便,还能大幅缩减有限元计算时间。通过钢筋整体等效的方法模拟大体积混凝土承台钢筋,模拟计算结果可用于预测和指导实际工程中承台水化热温控过程。

参考文献:

- [1] 强晟,周水兵,倪言波,等.钢筋对闸墩混凝土早龄期应力影响的数值分析[J].三峡大学学报(自然科学版),2015,37(5):1-4.
- [2] 朱伯芳.水工钢筋混凝土结构的温度应力及其控制[J].水利水电技术,2008,39(9):31-35.
- [3] 章征,王凯,李毓龙,等.混凝土桥墩施工期水化热及表面抗裂影响因素研究[J].桥梁建设,2015,45(2):65-70.
- [4] 汪建群,魏桂亮,刘杰,等.跨海大桥大体积混凝土承台水化热实测与分析[J].桥梁建设,2020,50(3):25-31.
- [5] 王建军,梁军林,周胜波,等.基于 Midas 的拱座基础大体积混凝土温度影响因素分析[J].中外公路,2019,39(2):89-93.
- [6] 万华,谭振华.南洞庭特大桥主桥承台大体积混凝土防裂施工技术[J].中外公路,2017,37(3):141-144.
- [7] 孙增智,田俊壮,石强,等.承台大体积混凝土里表温差梯度与温差应力有限元模拟[J].交通运输工程学报,2016,16(2):18-26+36.

收稿日期:2022-09-21

(上接第 110 页)

锚固调节装置。提升抗风绳和吊杆至猫道扶手绳高度,先拆除吊杆,然后横移抗风绳进入猫道以内,下放至猫道面网后,完成抗风系统拆除。

5 结语

哈罗格兰德大桥猫道主跨跨度大,宽度窄,横向刚度很小,易在风荷载作用下产生较大横向变形导致猫道破坏,也增加了作业人员的安全风险,需设置专门的抗风系统。主塔塔顶及承台的锚固系统均设置球形垫板和关节轴承,以满足抗风系统运作期间抗风绳三维空间的位移要求。猫道有限元计算和猫道节段风洞试验结果显示其抗风性能满足要求。抗风系统架设时采用整体同步下放的方法,极大简化了施工工序。该猫道抗风系统经历了最大瞬时风速 35.5 m/s 的考验,整个结构运作良好。

参考文献:

- [1] 欧洲标准化委员会“欧洲建筑工程规范”技术委员会.欧洲规范:结构设计基础:EN 1990:2002[S].欧洲标准化委员会,2002.
- [2] 欧洲标准化委员会“欧洲建筑工程规范”技术委员会.欧洲规范 3:钢结构设计 第 1-1 部分:一般规定和建筑规定:EN 1993-1-1-2005[S].欧洲标准化委员会,2005.
- [3] 欧洲标准化委员会“欧洲建筑工程规范”技术委员会.欧洲规范 3:钢结构设计 第 1-11 部分:受拉构件的结构设计:EN 1993-1-11-2006[S].欧洲标准化委员会,2006.
- [4] 挪威公共道路管理局.挪威通用规范 2:桥梁和码头标准规范:HB-026[S].挪威公共道路管理局,2007.

收稿日期:2022-02-28