

开阔海域环境锚碇区钢箱梁顶推施工技术

谢书良, 吴育剑, 吴琦, 吴聪, 朱书敏

(保利长大工程有限公司, 广东 广州 511431)

摘要: 针对海域环境下超重超高钢箱梁施工, 通常采用“大节段吊装整体顶推”“小节段吊装滑移”和“超大浮吊原位架设”等方案进行施工, 结合深中通道工程伶仃洋大桥引桥钢箱梁施工, 在保证施工进度的前提下, 同时为克服锚碇区域场地受限、大型浮吊档期难以确定, 租赁费用高等缺点, 在以上方案的基础上通过多次比选及优化, 最终确定采用了“整跨吊装+临时支墩+前、后钢导梁+步履式千斤顶+智能化监控”的大节段整体顶推技术, 在国内首次实现了恶劣海况条件下高墩、大跨、超重钢箱梁多点同步连续顶推, 智能化联动监控。保证了箱梁顶推过程中梁段线形、应力应变可控, 安全、高效地完成了锚碇上方区域钢箱梁的安装。

关键词: 开阔海域环境; 锚碇区域; 钢箱梁顶推; 大节段吊装

中图分类号: U445.462

文献标志码: A

文章编号: 1009-7716(2025)06-0242-06

Incremental Launching Technology of Steel Box Girder in Anchorage Area of Open Sea Environment

XIE Shuliang, WU Yujian, WU Qi, WU Cong, ZHU Shuming

(Poly Changda Engineering Co., Ltd., Guangzhou 511431, China)

Abstract: For the construction of overweight and ultra-high steel box girders in marine environments, various schemes such as “large segment hoisting and integral incremental launching”, “small segment hoisting and and slippage” and “ultra-large floating crane and in-situ erection” are commonly used for construction. Combined with the construction of steel box girders for the approach of Lingdingyang Bridge in the Shenzhong Channel Project, under the premise of ensuring the construction progress, the problems of limited anchorage area, difficulty in determining the schedule of large floating cranes, and high rental costs are also solved. Based on the above schemes, through multiple comparisons and optimizations, it is finally determined to adopt the large segment hoisting and integral incremental launching technology of “integral span hoisting + temporary support piers + front and rear steel guide beams + walking jacks + intelligent monitoring”. For the first time in China, the multi-point synchronous continuous incremental launching of high piers, large spans and overweight steel box girders under the harsh sea conditions are realized including the intelligent linkage monitoring, which ensure that the linear shape of the girder segment, and the stress and strain are controllable during the incremental launching of box girder. The erection of steel box girder is safely and efficiently completed in the area above the anchorage.

Keywords: open sea environment; anchorage area; incremental launching of steel box girder; large segment hoisting

0 引言

随着我国桥梁施工技术的飞速发展,越来越多的跨海大桥应运而生,随着虎门大桥、武汉杨泗港长江大桥、香港青马大桥、港珠澳大桥、南沙大桥等世界级桥梁的建设,打造出了一批属于中国的一流交通基础设施,创新了缆索体系桥梁建设技术,构建了跨江跨海桥梁建设管理体系,促进了我国桥梁行业

的不断进步。对此,本文结合工程实例,分析了开阔海域环境下悬索桥锚碇区域引桥超高(起吊高度 ≥ 40 m)超重(每延米梁重 ≥ 12 t)钢箱梁顶推施工技术。

1 工程概况

深中通道项目北距虎门大桥约30 km,南距港珠澳大桥约38 km。该项目全长约24 km,其中跨海段长22.4 km,采用100 km/h的设计速度、双向8车道高速公路技术标准,是集“桥、岛、隧、地下互通”为一体的系统集群海洋超级工程。钢箱梁顶推部分位于珠江出海口宽阔水域段的伶仃洋大桥西锚碇区域(见

收稿日期: 2024-09-10

作者简介: 谢书良(1971—),男,工学学士,高级工程师,从事路桥施工技术管理工作。

图1)。此处海况、气候、地质条件复杂,常年风速较大,水域平均流速超0.5 m/s,平均潮差在0.85~1.70 m,覆盖层上部淤泥层厚12.1~16.7 m,力学性质差,对钢箱梁顶推支架的设计及50 m高空钢箱梁顶推施工作业提出了更高的挑战。为此,本文结合实际工程,采用分段顶推施工,钢箱梁分段长度为133.5 m+110 m×5+86.5 m,分两幅单跨整体制造安装,单幅宽度为20 m,高4 m,其中顶推区域为4、5、6跨钢箱梁,设计第4跨钢箱梁长110 m,总重1 252.6 t,第5跨钢箱梁长110 m,总重1 295.3 t,第6跨钢箱梁长86.5 m,总重1 025.0 t^[1],如表1所列。

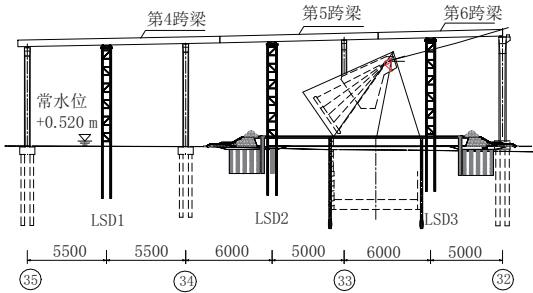


图1 西锚碇区域一联钢箱梁布置图(单位:m)

表1 锚碇区域一联钢箱梁重量表

梁段类型	1#跨	2#跨	3#跨	4#跨	5#跨	6#跨
梁段长/m	133.5	110	110	110	110	86.5
梁段重/t	1513	1 258.1	1 252.6	1 252.6	1 295.3	1 025.0
每延米重/t	12					

2 方案比选

针对锚碇上方钢箱梁大节段重量大、起吊高度高、顶推作业时间长的特点,前期对采用“3跨小节段吊装+滑移方案”“超大型浮吊原位架设”和“大节段吊装整体顶推”3种吊装方案进行了综合比选。

(1)采用“3跨小节段吊装+滑移方案”方案,即搭设满堂支架,进行小节段吊装滑移,桥位焊接成型。优点:避开锚碇施工临时人工岛及栈桥平台影响,小节段吊装灵活;缺点:满堂滑移支架材料用量庞大(1 000 t),安装困难大(跨径50 m),现场线形调整繁琐,焊接量大、质量控制相对困难。

(2)采用“超大型浮吊整跨原位吊装”方案,即采用超大型浮吊(5 000 t)原位架设。优点:无须搭设大型支架;缺点:档期不确定,配套费用高(进出场、清淤等),仅能适应东锚碇,我部西锚碇无法实施(此处水域深度仅3 m,不满足超大型浮吊吃水深度要求、需拆除锚碇施工临时人工岛)^[2]。

(3)“大节段吊装整体顶推”方案,即采用2跨节

段滑移顶推方案进行架设。优点:减少支架搭设量,施工效率相对较高;缺点:顶推滑移支架与岛壁结构严重冲突,岛体拆除前无法实施,影响施工进度。

通过综合比选,选用了“大节段吊装整体顶推”方案,同时考虑到超大型浮吊船的最大起吊高度,为确保吊装安全,需将原两跨顶推调整为3跨顶推,故最终确定采用了“3跨大节段吊装整体顶推方案”,该方案远离锚碇范围,可在低墩区吊装喂梁,降低了吊装高度,解决了锚碇区域水浅无法满足大型起重船吊装作业的问题,同时降低了顶推的搭设支架规模(3 000 t),能较好地适用于该工程的作业环境条件。

3 大节段吊装整体顶推方案的实施

3.1 工程概况

本文顶推方案的总体施工流程为:在32#~36#墩之间搭设4个临时支墩→安装顶推设备→采用浮吊船在第36#墩和临时墩之间吊装第6跨86.5 m钢箱梁→依次安装前、后导梁→第6跨箱梁向主桥方向累计顶推101 m→拆除后导梁→在第36#墩和临时墩之间吊装第5跨110 m钢箱→第5跨箱梁向主桥方向顶推1.0 m→第5跨箱梁与第6跨箱梁匹配连(焊)接→安装后导梁→第5、6跨箱梁整体向主桥方向顶推110 m→拆除后导梁→…,依此类推,直至完成第4、5、6跨箱梁整体姿态调整、落梁、合龙及匹配连(焊)接。

3.2 顶推支架设计与施工

(1)顶推支架设计

依据钢箱梁布置及顶推工艺要求,临时支墩分左右幅分别布置,采用水平钢管桁架连接,共布置4个临时支墩LSD1~LSD4,左右幅临时支墩中心距离桥梁中心线均为10.25 m。临时支墩设计采用钢管立柱、基础采用钢管桩或钻孔灌注桩、采用钢管平联、并由型钢承重梁及垫梁组成。每个临时支墩平面尺寸为10.4 m×7.0 m,墩顶标高55.250~62.110 m,位于水域中的临时墩钢管桩单根桩顶最大反力约183.6 t,入河床深约35 m;位于西锚碇筑岛上临时墩基础灌注桩桩顶最大反力约523.4 t,桩长约45 m,设计图如图2至图3所示。

(2)顶推支架施工

施工流程:测量放样→支架基础管桩插打→垫梁、钢管立柱、平联斜撑及承重梁后场加工及现场安装→顶推施工完后支架拆除。

施工过程采用了如下关键技术。

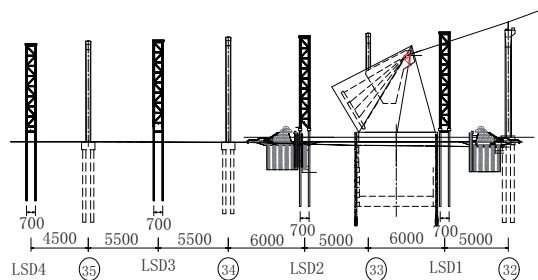


图2 临时支墩布置图(单位: cm)

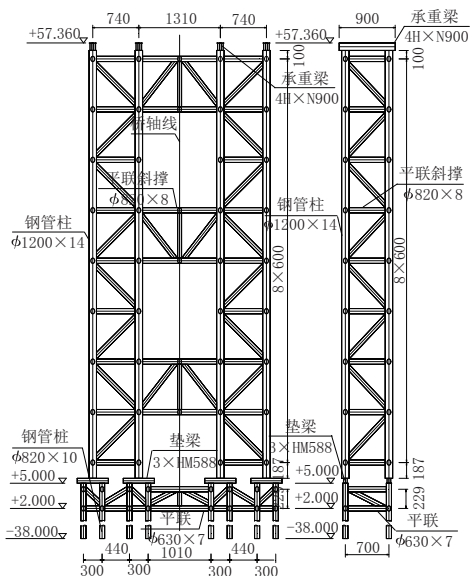


图3 临时支墩LSD3结构图(单位: cm)

(1) 临时墩刚度提升技术

由于临时支墩为高瘦框架结构,纵桥向高宽比超限(临时墩高度:宽度 >7.5 m),刚度弱,施工时采用了临时墩刚度提升技术,即1#~3#临时墩墩顶与引桥墩采用4组5束钢绞线进行串联,如图4所示,并预张拉25 t初始力,提高临时墩顺桥向刚度。张拉时机:以临时墩为中心,前、后跨,左、右幅对称同步张拉。

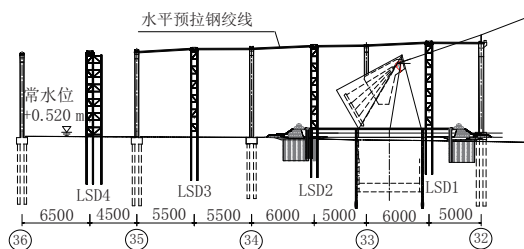


图4 临时支墩钢绞线串联示意图(单位: cm)

(2) 临时墩支架渡台抗风技术

台风来临之前,通过临时墩顶竖向千斤顶顶升钢箱梁,在相应临时墩顶步履器钢支撑上安置聚四氟乙烯滑动摩擦副,释放临时墩顶与钢箱梁的横向约束,减小钢箱梁横向风荷载传递至临时墩比例,确保临时墩安全渡台。

(3) 高墩支架快速安拆技术

对临时墩支架进行分节设计,后场模块化预制,

现场部品化安装,相较传统支架安装,提高了安装功效,减少了高空作业风险,保障了支架搭设质量;同时设计了一种快速拆除梁底支架的移动式拆卸装置(即在钢箱梁底及梁面分别设置一组4拼贝雷梁,通过12 t卷扬机及动滑轮组提升梁底贝雷梁实现临时墩的拆除,同时利用移动小车作为行走装置实现临时墩的纵桥向移位(见图5),实现了梁底空间受限情况下的临时墩支架部品化拆除,具有拆除便捷、风险低、成本少的优点,为桥面拆除梁底结构物提供了一种新思路。

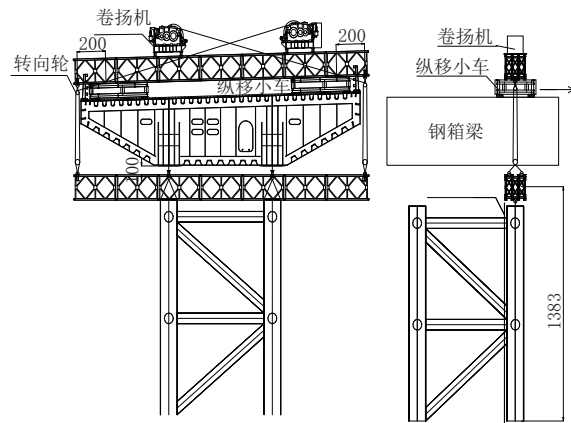


图5 临时支墩部品化拆除示意图(单位: cm)

3.3 顶推设备布设

针对本钢梁结构顶推方案设计,步履式顶推钢结构(滑箱)和竖向顶布置在外侧箱室的腹板中心正下方,每个顶推支墩(左右幅)布置4台顶推钢结构,8台800 t竖向顶,1台液压泵站(左右幅共用),顶推施工采用800 t级步履式顶推设备^[3],该顶推设备长1.7 m,宽1.2 m,高0.5 m,顶升力800 t、顶推力80 t、行程20 cm,顶推速度2~5 m/h。设备布置形式如图6所示。

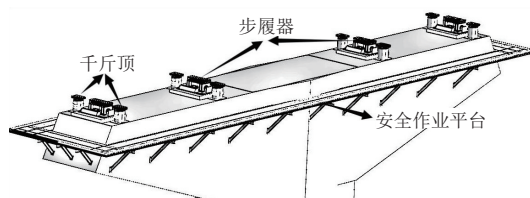


图6 顶推设备布置示意图

3.4 钢箱梁吊装

该顶推钢箱梁共3跨6片钢箱梁,均由超大型浮吊船(运、架梁一体)在取梁码头起吊、夹持固定,沿既定路线,运输至西锚碇施工现场进行架设作业,该工程采用浮吊船的最大起重能力为3 600 t,吊高(钢箱梁底板至甲板高度)56 m,满载吃水深度为3.7 m,吊装净宽要求50 m。

运架一体船航行前,需事先收听气象预报,掌握海上流速和波浪情况,了解风力、风向,以便正常航行。航行中必须充分考虑到横流和横风等对船舶的影响,及早采取措施,保持船舶在计划的航线上航行。航行中需控制航速,且注意瞭望,以确保航行安全^[4]。

为解决钢箱梁与猫道冲突的问题,对西锚碇区域顶推安装的末孔 86.5 m 钢箱梁,进行了切割分块制造安装设计,为此切割后梁段较原梁段重心产生了偏移。切割分块后钢箱梁重心与吊点横肋中心顺桥向偏差 0.1 cm,满足吊装要求,横桥向偏差 1.73 m,不能满足吊装要求,钢箱梁切割后重心位置如图 7 所示。

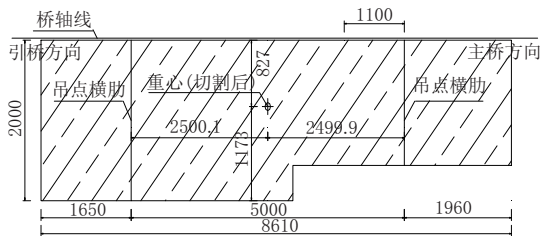


图7 第6跨钢箱梁切割缺口后重心位置示意图(单位:cm)

因此须进行平衡压重,调节钢箱梁横桥向重心位置,以满足浮吊吊装安全要求。经过模拟计算,需在钢箱梁两个吊点横肋外侧,远离桥轴线侧进行压重,主桥方向端配重 55 t,引桥侧端压重 60 t。压重采用水袋+固定框架形式实施。具体布置位置及范围如图 8 所示。

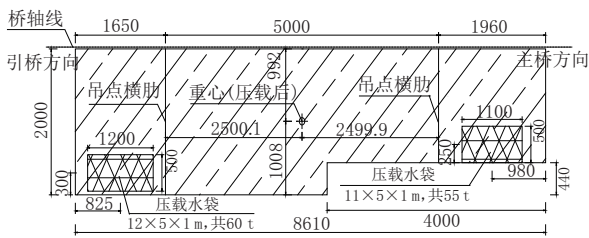


图8 第6跨钢箱梁配重示意图(单位:cm)

3.5 顶推施工

单幅钢箱梁顶推施工分 3 轮进行,吊装第 6 跨钢箱梁,安装前后导梁,第一轮将第 6 跨钢箱梁向主桥方向顶推 101 m 后,拆除后导梁,吊装第 5 跨钢箱梁,并在调整钢箱梁线形后将第 6 跨与第 5 跨钢箱梁焊接为一个整体,安装后导梁,开始第二轮钢箱梁顶推施工。

第二轮顶推距离为向主桥 110 m;第二轮顶推完成后同样需要拆除后导梁,吊装第 4 跨钢箱梁,调整钢箱梁线形后将 3 跨钢箱梁焊接为一个整体,安装后导梁,开始第三轮顶推施工。

第三轮将钢箱梁顶推超出设计位置 1 m 留足合龙段钢箱梁吊装空间,拆除导梁,待合龙段安装完成将 3 跨钢箱梁回顶至设计位置与合拢段钢箱梁进行线形调整后落梁,钢箱梁顶推施工完成,顶推示意图如图 9 所示。

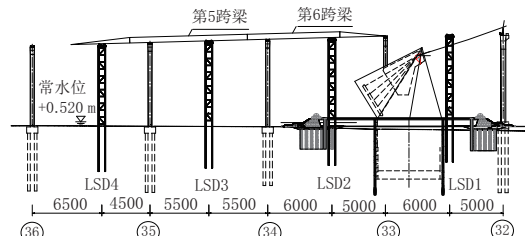


图9 第二轮第5、6跨钢箱梁顶推示意图(单位:cm)

该顶推施工过程为匹配钢箱梁顶推跨度,采用了前、后双导梁结构,单轮顶推到位后需反复 3 次安拆后导梁,单幅完成后需拆除 1 次前导梁,为解决导梁反复拆装的问题,采用提前在钢箱梁上设置连接段,连接段与导梁节段通过匹配件精准快速连接,实现钢导梁快速安拆周转,提高导梁安装效率与质量。

3.6 顶推监控

为了保证钢箱梁顶推施工质量及安全^[5],在顶推实施过程中,需对钢箱梁的位姿状态、钢箱梁、导梁及临时墩等结构的受力状态进行实时监测^[6-8],监测监控部位、频率及方法如表 2 所列。

表2 钢箱梁顶推施工监测监控内容汇总表

序号	监测部位	监测监控内容	监测方法	监测频率
1	钢箱梁	前端及后端三维偏位	全站仪监测	观测 1 次/前进 1 m
2	导梁	前端三维偏位	全站仪监测	观测 1 次/前进 1 m
3	临时墩	水平位移及沉降	全站仪或水准仪监测	观测 1 次/5 个顶推行程

钢箱梁顶推梁体、导梁及临时墩监测采用全站仪及水准仪观测,钢箱梁监测点布置在钢箱梁前端及后端中线处,导梁监测点布置在两支前端顶面,临时墩监测点布置在墩顶承重梁上,详细点位布置如图 10 所示。

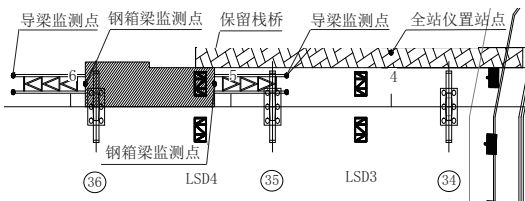


图10 顶推施工监测点布置示意图

钢箱梁顶推监测监控,以上各监测项,在加载前,首先观测初始值,加载后严格按监测频率实施。

监测监控预警值详细如下。

钢箱梁扰度 41 mm, 轴线偏位 50 mm; 前导梁扰度 196 mm, 轴线偏位 100 mm; 后导梁扰度 439 mm, 轴线偏位 150 mm; 临时墩沉降累计 35 mm, 水平位移 78 mm。

顶推监控过程中采用了智能化监控技术, 即采用联动控制系统, 带动 36 套步履式千斤顶, 同时引入“GNSS”实时定位技术, 以临时墩支反力为依据, 采取顶推力和顶推位移双控原则, 实现了对钢箱梁、临时墩、步履器等状态的联合监测, 通过实时分析、快速响应机制, 确保了顶推过程的顺利有序, 安全可控。

3.7 钢箱梁整体线形调整

第 4、5、6 跨梁整体向引桥方向, 顶推退回约 1 m, 与合龙段(第 3 跨)钢箱梁对接。合龙接口匹配连接, 首先按照监控指令要求, 利用步履顶推器及千斤顶, 对钢箱梁整体进行线形调整, 钢箱梁精确定位采用 800 t 步履式顶推千斤顶进行, 可获取对钢箱梁的底高度、短距离的垂直方向(Y)、横向(X)和纵向(Z)的位移^[9]。精确对位前, 先检查钢箱梁的偏位。根据偏位数据, 首先利用千斤顶将钢箱梁顶离临时支座约 2 cm, 再根据标记或限位进行移位^[9]。按照先轴线, 再里程, 后标高的顺序反复调整梁段, 直到梁段空间位置与设计及监控指令要求相符。

钢箱梁精调完成后, 进行临时连接。临时连接完成后, 交由钢箱梁加工厂家, 在合适时机采用码板连接锁定钢箱梁接头位置, 再进行全断面栓、焊连接。

钢箱梁大节段间的现场连接除箱梁顶板 U 肋、板肋采用栓接, 其余板件及其加劲肋均采用焊接。

现场连接过程中严禁冲钉强行打入, 损伤螺栓孔。顶板对接焊接时, 应采取有效措施, 避免约束焊缝收缩, 增加焊缝缺欠。

3.8 钢箱梁落梁

待支座安装混凝土灌浆强度达到要求后, 采用落梁千斤顶进行卸载落梁^[10-11], 完成钢梁的安装施工。

落梁千斤顶利用步履设备的竖向千斤顶, 每个顶推支墩配置 4 台 400 t ~ 500 t 液压千斤顶。其中由于设备布置空间高度限制, 33 ~ 34# 永久墩落梁至最后一个行程时更换 160 mm 行程的 400 t 矮顶进行落梁, 其他墩落梁千斤顶不需更换直接参与落梁。

落梁实施步骤为: 钢箱梁全桥顶推到位, 调整线形符合设计要求, 准备落梁工作→竖向千斤顶顶起

钢箱梁脱空步履器, 安装支座和支座调平钢板, 在支座垫板上抄垫→进行同步落梁, 拆除抄垫与竖向千斤顶的抄垫进行交替落梁, 落梁完成一个行程→更换 400 t, 行程为 160 mm 的落梁千斤顶→继交替落梁至钢箱梁落到支座上完成体系转换→拆除千斤顶和垫块, 完成落梁施工^[12]。

4 大节段吊装整体顶推施工计算

4.1 荷载计算

(1) 自重荷载

钢箱梁和导梁自重荷载, 在 MIDAS Civil 模型中自动计入。前导梁长 43 m, 重 98.5 t, 后导梁长 55 m, 重 120.5 t。

(2) 风荷载

根据《深圳至中山跨江通道工程桥位气象观测及风参数研究》考虑了宽阔水面效应, 结合台风数值模拟成果, 并参考临近港珠澳大桥的实测参数, 通过研究得到伶仃洋大桥位标高 60 m 高度 50 a 重现期 10 min 平均风速为 47.2 m/s, 根据《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018), 横桥向风作用下主梁单位长度上的顺风向等效静阵风荷载^[13], 按下式计算:

$$F_g = \frac{1}{2} \rho U_g^2 D C_H \quad (1)$$

$$C_H = \begin{cases} 2.1 - 0.1 \left(\frac{B}{D} \right) & 1 \leq \frac{B}{D} < 8 \\ 1.3 & 8 \leq \frac{B}{D} \end{cases}$$

式中: F_g 为作用在主梁单位长度上的顺风向等效静阵风荷载, N/m; ρ 为空气密度, kg/m^3 , 取 1.25 kg/m^3 ; U_g 为等效静阵风风速, m/s; C_H 为主梁横向力系数, 取 1.6; D 为主梁特征高度, m, 取 4 m; B 为主梁特征宽度, m, 取 20 m。

$$U_g = G_v U_d \quad (2)$$

$$U_d = k_f k_t k_h U_{10}$$

式中: G_v 为等效静阵风系数, 取 1.26; U_d 为构件基准高度 Z 处的设计基准风速, m/s; k_f 为抗风风险系数, 取 1.02; k_t 为地形条件系数, 取 1.0; k_h 为地表类别转换及风速高度修正系数, 取 1.46; U_{10} 为基本风速, 正常工作状态取 20.7 m/s (8 级风), 极限状态 100 a 重现期 10 min 平均风速为 43.0 m/s。

计算可得, 正常工作状态下横桥向作用在主梁单位长度上的顺风向等效静阵风荷载 $F_g = 6034.6 \text{ N/m}$ 。

(3) 荷载组合

钢箱梁自重荷载,模型自动计入,荷载分项系数考虑 1.2;风荷载 $F_g = 6\,034.6\text{ N/m}$,荷载分项系数考虑取 1.4。

4.2 顶推计算工况

顶推计算工况如表 3 所列。

表 3 顶推施工主要计算工况

工况	钢箱梁状态
1	第 6 跨 86.5 m 箱梁,吊装于 36#墩和 LSD4 临时墩上,安装前后导梁,向主桥方向顶推 101 m,完成第 1 轮顶推
2	拆除第 6 跨箱梁后导梁,于 36#墩和 LSD4 临时墩吊装第 5 跨 110 m 箱梁,与第 6 跨箱梁连接,安装后导梁,整体向主桥方向顶推 110 m,完成第 2 轮顶推
3	拆除第 5、6 跨箱梁后导梁,于 36#墩和 LSD4 临时墩吊装第 4 跨 110 m 箱梁,与第 5、6 跨箱梁连接,安装后导梁,整体向主桥方向顶推 153 m(超过设计位置 1 m),待第 3 跨(合龙段)箱梁吊装后,将 4、5、6 跨箱梁整体向引桥方向顶推(退回)1 m,与第 3 跨(合龙段)箱梁连接,完成第 3 轮顶推

4.3 模型建立

采用有限元软件 MIDAS Civil,建立钢箱梁及导梁模型(见图 11 至图 13),根据钢箱梁顶推施工工艺,对顶推过程进行模拟计算分析。并依据有限元软件计算分析结果,对钢箱梁局部强度及稳定性进行验算分析,确保三种工况钢箱梁及导梁均满足要求。

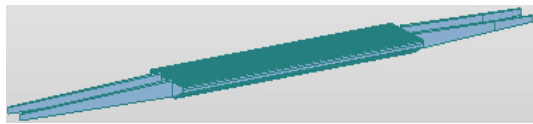


图 11 工况 1 第 6 跨钢箱梁(86.5 m)+前后导梁

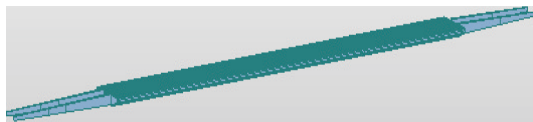


图 12 工况 2 第 6+5 跨钢箱梁(196.5 m)+前后导梁



图 13 工况 3 第 6+5+4 跨钢箱梁(306.5 m)+前后导梁

根据 3 种工况计算分析,对各工况钢箱梁及导梁整体强度及刚度进行汇总,详见表 4。

表 4 钢箱梁顶推各工况最大应力及位移汇总表

工况	钢箱梁最大应力/MPa	钢箱梁最大位移/mm	前/后导梁最大应力/MPa	后/前导梁最大竖向位移/mm
1	36.4	25.1	77.9/120.5	348.2/153.1
2	51.2	32.0	77.9/120.5	438.5/189.1
3	50.7	40.5	77.9/120.5	388.9/195.4

根据计算结果可得如下结论。

(1)钢箱梁整体最大组合应力出现在工况 2,最大组合应力值为 51.2 MPa;前导梁整体最大组合应

力出现在最大悬臂,最大组合应力值为 77.9 MPa;后导梁整体最大组合应力出现在最大悬臂,最大组合应力值为 120.5 MPa。

(2)钢箱梁竖向最大位移出现在工况 3,最大值为 40.5 mm;后导梁最大位移出现在工况 2,最大值为 438.5 mm;前导梁最大位移出现在工况 3,最大值为 195.4 mm。

(3)顶推方案钢箱梁及导梁强度及刚度均满足设计及规范要求^[14]。

5 结 语

深中通道伶仃洋大桥西引桥钢箱梁施工中采用了“低墩区吊装喂梁、大节段长距离顶推”技术,解决了复杂海域环境下水深不足、吊高受限、围堰筑岛及猫道冲突等难题,通过技术创新推动了项目工期进度,保证了后续桥面铺装的顺利推进,筑牢了安全质量底线,实现了深中通道通车节点目标。同时,对今后类似开阔海域环境下锚碇区域超高超重钢箱梁顶推施工起到了很好的借鉴作用,具有显著的社会效益和推广价值。

参考文献:

[1] 裴岷山,吴明远.深圳至中山跨江通道泄洪区非通航孔桥施工图设计[Z].北京:中交公路规划设计院有限公司,2019.

[2] 薛志武,梁丰.深中通道海中锚碇上方钢箱梁架设方案比选[J].桥梁建设,2023,53(2):142-148.

[3] 张伯林.蝴蝶式拱桥整体顶推施工控制[J].山西建筑,2020,47(23):111-113.

[4] 陈春华,曾献柏.上海崇明越江通道长江大桥 105 m 钢-混凝土组合梁运输安装方案[J].世界桥梁,2008(增刊 1):48-51.

[5] 崔清强.复杂预制线形钢箱梁顶推计算分析[J].桥梁建设,2009(6):50-53.

[6] 倪学平,谭旺,阳维华,等.洪奇门特大桥钢箱梁智能顶推施工关键技术[J].世界桥梁,2024,52(3):29-35.

[7] 叶建良.瓯江北口大桥北引桥槽形钢箱梁顶推施工关键技术[J].桥梁建设,2020,50(增刊 2):115-120.

[8] 林清清,张晓辉.大跨度钢箱梁顶推过程的精细化智能监控技术[J].港工技术,2022,59(5):68-72.

[9] 张先忠,闫祥梅,张选印.郑州某快速通道立交工程钢箱梁吊装施工方案设计[J].河南科技,2016(5):117-119.

[10] 林国伟,石恒.既有简支钢桁梁桥抬升施工关键技术[J].世界桥梁,2021,49(3):108-112.

[11] 耿树成.孟加拉帕德玛大桥铁路连接线简支钢桁梁顶推架设技术[J].世界桥梁,2022,50(5):27-33.

[12] 贾正滴,吴健林.三棵树互通 D 匝道 2 号桥钢箱梁顶推施工[J].云南水力发电,2020,36(7):70-74.

[13] 王虎.悬索桥概念设计颤振稳定性分析研究[U].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.

[14] 陈鹏,刘月,李璇,等.钢箱梁步履式顶推施工力学行为分析[J].国防交通工程与技术,2023,21(6):35-39;68.