

内河航道受限空间下钢桁梁桥顶推施工 关键技术研究

李巧生

(苏州市港航事业发展中心, 江苏 苏州 215008)

摘要: 为解决受限空间下碍航桥梁改造难题, 打通水陆交通堵点。结合上跨太仓杨林塘航道沪宜高速(S48)上关键节点工程苏昆太高速公路桥改建工程, 分析总结了复杂受限空间下跨航高速公路钢桁梁桥分节段步履式顶推施工关键技术和工艺, 同时根据受力复杂的水中临时支架及最不利工况下钢桁梁的受力和稳定性计算结果, 验证了方案的合理性, 并通过施工监控数据及实施效果进一步验证了方案的可行性, 为今后城建交通受限空间下桥梁及线路改造提供了参考。

关键词: 受限空间; 分节段; 钢桁梁; 顶推施工

中图分类号: U445; TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)09-0366-05

Research on Key Technologies for Incremental Launching Construction of Steel Truss Girder Bridge in Confined Spaces of Inland Waterways

LI Qiaosheng

(Suzhou Port and Waterway Development Center, Suzhou 215008, China)

Abstract: To address the challenges of reconstructing the bridge impeding navigation in confined spaces, the bottlenecks in water and land transportation are eliminated. In combination with the reconstruction project of the Suzhou-Kunming-Taiyuan Expressway Bridge as a key node project on the Shanghai-Yichang Expressway (S48) crossing the Yanglintang Channel in Taicang, the key technologies and processes for segmental step-by-step incremental launching construction of steel truss girder bridges in complex confined spaces are analyzed and summarized. At the same time, based on the calculation results of the force and stability of the steel truss girder under the most unfavorable constructing conditions and the temporary support in the water with complex forces, the rationality of the scheme is verified. The feasibility of the scheme is further verified through the construction monitoring data and implementation effects, providing a reference for the reconstruction of bridges and lines in confined spaces of urban construction traffic in the future.

Keywords: confined space; segmented; steel truss girder; incremental launching construction

0 引言

近年来,碍航桥梁的快速化改造研究越来越受到人们关注。一般来讲,碍航桥梁往往既是水上交通堵点,也是城市交通的咽喉。这类桥梁改造都有以下特点^[1]:一是施工期需保障水路和陆路交通通畅,二是桥梁施工环境复杂,空间受限。因此,仔细研究和选择一个好的施工方案,不仅关乎施工工期和成本,更决定了整个项目对社会运行的影响程度。在这类桥梁建设中,国内外工程师均进行了有益的尝试,诸如刘强华^[2]在大跨度斜靠式航道桥梁施工

中选择了浮拖法,葛炜^[3]在受限空间下大跨度钢结构人行天桥施工中采用大阶段吊装施工工艺,R.Chacón^[4]等则深入地研究了桥梁顶推施工方法等等,这些施工方法都有一定的优势,但在通航航道受限空间下的桥梁改造上都存在一定的不足。比如,浮拖法需要断航施工,同时对航道尺度也有一定要求;大节段吊装不仅需要拼装场地,还需要施工点位周边没有妨碍吊装的建筑物和高压线等;而一般顶推施工至少需要有一个较大的拼装场地等。

目前,航道桥梁周边建筑物林立,高压线、管线纵横密布的情况普遍,国内外的技术现状对如何在空间特别狭小、周边高压、管线密布的通航航道环境下进行桥梁改造研究较少,因此,解决好内河航道受限空间下的桥梁改造是当下亟须面对的难题。

收稿日期: 2026-02-12

作者简介: 李巧生(1985—),男,硕士,高级工程师,从事港口航道整治及跨航桥梁建设工作。

1 工程概况

1.1 项目基本情况

杨林塘三级航道横贯昆山和太仓两市,是长三角核心区干线航道网中“二纵四横”重要组成部分,也是苏州内河通往太仓港和上海外高桥等国际航运中心主要的集装箱通道。苏昆太高速公路桥为杨林塘航道整治工程中最后一座需要实施改建的碍航桥梁,为实现内河航道碍航桥梁快速化改造,新建桥梁仅改造三联,全长为192.5 m。桥梁(左幅)主桥主跨为93.4 m下承式钢桁梁桥梁中心线与航道交角为 120° ,因左右幅桥梁结构及施工环境基本相同,下面仅以左幅为例。

桥梁改造总体采取拆旧建新,半幅保通的建设思路,即可供新桥施工作业的场地仅为老桥拆除腾出的一跨桥梁的地面,同时场地周边还有省级公益林、高压线、西气东输燃气管道环绕,航道和高速还须保通。因此,新桥建设场地十分受限。

桥梁布置见图1。

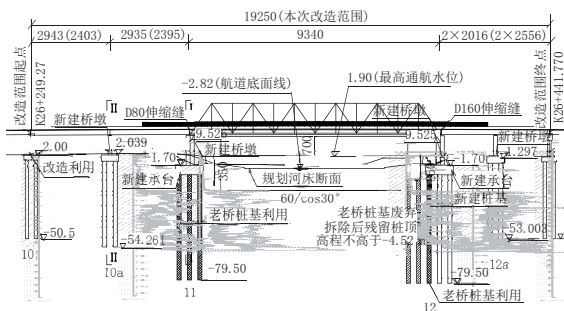


图1 桥梁布置图(单位:cm)

1.2 方案选择

考虑到施工期间沪宜高速 S48 及杨林塘航道不中断交通,现场可供项目施工作业场地仅为老桥一联引桥拆除后腾出的(48.5 m×15.5 m)长方形场地。且场地省级公益林环绕、两侧高压线距离 100 m 范围、西气东输管道相距 10 m 左右,因此,经方案研判比选,现场不具备浮拖、大节段吊装或整体顶推等作业条件,最终采用钢桁梁分节段步履式顶推施工工艺^[5-9]分节段步履式顶推施工工艺是一种将大跨度钢桁梁桥分为多个小节段分步骤拼接—顶推—再拼接—再顶推,实现钢桁梁平稳、精准、多向可控前移的施工方法。这种施工工艺通过”化整为零“,小节段可便于受限空间内的作业,同时步履式千斤顶集成竖向顶升、顺桥推进、横桥纠偏三维纠偏,可适应坡度、曲线、变截面等复杂线形施工安全和精度的纠偏要求。

场地周边管线分布见图2。

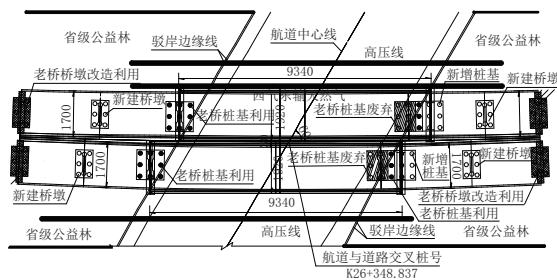


图2 场地周边管线分布(单位:cm)

2 分节段顶推施工

施工总体工序为:一是搭设顶推支架和拼装支架;二是墩顶设置若干组步履式三维千斤顶;三是拼装钢导梁分节段顶推;四是拼装钢桁梁分节段顶推,五是拆除前端钢导梁,六是顶推到位后,钢桁梁落梁。在搭临设施中,水中的顶推支架是受力最复杂,在钢桁梁顶推过程中最不利工况为钢导梁即将搭对上岸支墩的情形,因此,需要计算水中顶推支架以及钢桁梁顶推过程最不利工况应力变形及稳定性。

2.1 顶推系统

根据主桥钢结构的施工工艺及结构特点,方案中主桥钢桁梁顶推施工可分为顶推系统主体结构和顶推系统辅助结构两大部分,其中,顶推系统主体结构可分为主桥节段梁、步履式千斤顶及配套装置、顶推支架;顶推系统辅助结构主要由前端导梁和拼装支架组成。

2.1.1 顶推系统主体结构

本项目钢桁梁顶推系统主体结构起到钢桁梁的竖向起顶、纵向顶推和横向扭转的作用。主桥单个钢桁梁桁面分成6个节段(不含导梁)拼装接长,7次顶推落梁。主桥钢桁梁顶升支架体系材质均为Q235B钢材,尺寸为1.5 m×3.0 m,主要由 $\phi 630$ mm×8 mm钢管与[20a槽钢连接而成,顶端设置3拼或4拼H900×300型钢作为主桥钢桁梁顶推施工千斤顶滑道。

现场设有6组顶推支墩,共需投入12台450 t三维千斤顶、6套PLC分控制系统、4台液压泵站等。顶推支架上千斤顶及调节管均应满足最大竖向承载力450 t的承载力要求,竖向和横向均具有一定的纠偏或调节能力,一般来讲,竖向可自由调节长度不小于20 cm,横向可自由调节长度不小于10 cm,以便于施工。

同时考虑到主桥钢桁梁存在8~11 cm的预拱度以及不同工况下梁体局部可能存在脱空的情形,需

推25 m,拆除前端导梁;

第七次顶推,主桁架前推15 m,主桁架上永久墩,横向千斤顶纠偏,桥梁落梁到位。

3 工况验算

3.1 临时支架验算

本文项目施工用支架体系分为陆上顶推支架、陆上拼装支架和水中顶推支架3种类型,其中水中顶推支架受力最复杂,同时需要承受最不利工况,本文仅对水中支架进行复核算^[10-13](其他支架可参照验算)。数值模型采用MIDAS Civil软件建立水中顶推支架模型,根据桥梁位置地勘资料(见表2)以及相关规范,桩基入土深度25 m,嵌固点位置5.28 m,可计算出桩底反力。水中顶推支架桩底反力及一阶失稳模态见图5。

表2 桥位处地质情况

土层	层厚/m	侧摩阻力标准值 q_{sk}/kPa	地基承载力 q_{pk}/kPa
浮土	2.9	—	—
淤泥质粉质黏土	5.5	20	65
黏土	4.6	55	180
粉质黏土	4.8	36	120
粉质黏土	6.3	25	90
粉质黏土	2.7	38	140
砂质粉土夹粉砂	6.3	58	180

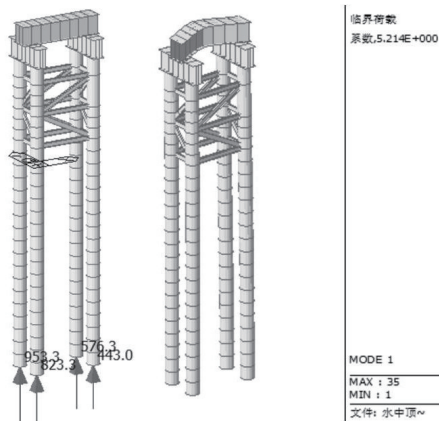


图5 水中顶推支架桩底反力及一阶失稳模态

数值模型结果显示,水中桩基底最大轴向反力为953.3 kN。同时根据《码头结构设计规范》(JTS 167—2018),可计算出钢管桩轴向抗压承载力为:

$$Q_d = \frac{1}{\gamma_R} (U \sum q_{si} l_i + \eta q_R A) \quad (1)$$

$$= 1/1.5 \times (1.979 \times (20 \times 5.5 + 55 \times 4.6 + 36 \times 4.8 + 25 \times 6.3 + 38 \times 0.9) + 0.8 \times 140 \times 0.312) = 983.19 \text{ kN} > N = 953.3 \text{ kN}$$

从式(1)计算结果可以看出,水中顶推桩基承载

力满足要求,同时模拟结果显示顶推支架的一阶屈曲系数为5.214>4,支架整体稳定性也满足要求。水中顶推支架横梁基本组合应力极值见图6。

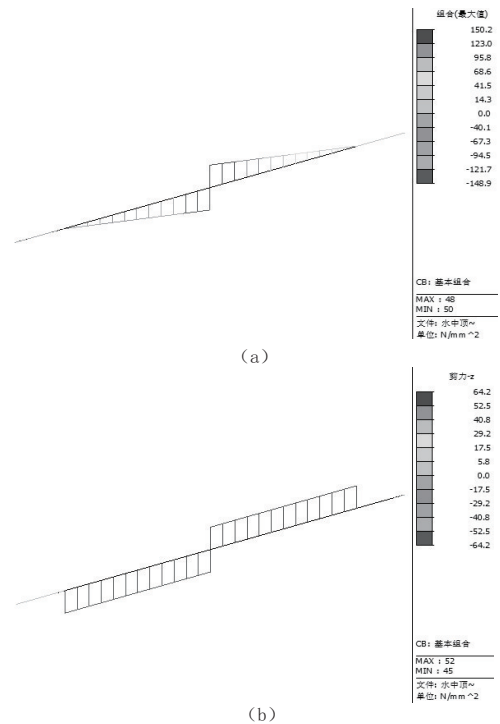


图6 水中顶推支架横梁基本组合应力极值(单位:MPa)

从计算结果可以看出,基本组合下纵梁组合应力极值为150.2 MPa<215 MPa,剪应力极值为64.2 MPa<125 MPa。

折算应力极值 $\sigma = \sqrt{\sigma_{\max}^2 + 3\tau_{\max}^2} = \sqrt{150.2^2 + 3 \times 64.2^2} = 186.88 \text{ MPa} \leq 1.1 \times 215 = 236.5 \text{ MPa}$,横梁强度满足规范要求(其它如纵梁、连接件、立柱等构件计算结果可参照计算)。

水中顶推支架位移变形见图7。

从计算结果可以看出,水中顶推支架最大竖向位移为5.4 mm,位于纵梁跨中,小于3 000/400=7.5 mm。嵌固点至支架顶最大高度约14.5 m,最大平动位移为37.5 mm<14 500/200=72.5 mm,支架刚度满足规范要求。

3.2 主桥钢桁梁应力变形及稳定性验算

项目实施中共历经7次分节段顶推施工,各工况受力也各不相同,本文仅对主桥钢桁梁(含钢导梁)最大悬臂状态即最不利工况下应力、位移、稳定性进行复核算(其他工况不再赘述),见图8、图9。

经计算,主桥钢桁(含钢导梁)顶推施工中,最大应力及位移出现在最不利工况(最大悬臂状态)下,最大组合应力136.1 MPa≤[σ]=215 MPa,最大位移85.62 mm≤[f]=L/300=37 900/300=126.3 mm,满足设计

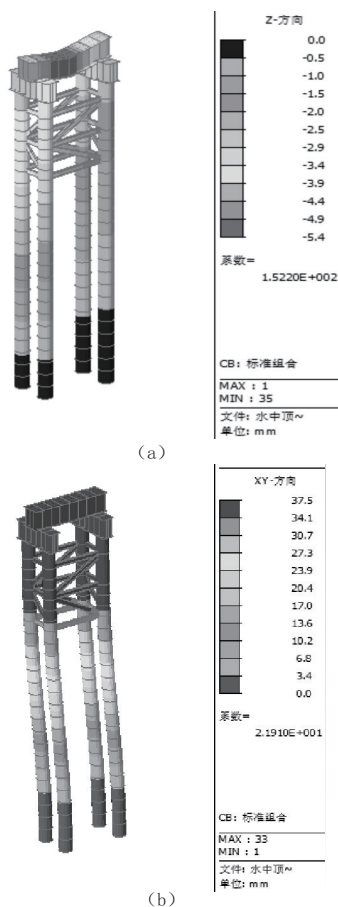


图7 水中顶推支架位移变形(单位:mm)



图8 主桥钢桁梁顶推过程中最大悬臂时应力验算



图9 主桥钢桁梁顶推过程中最大悬臂时变形验算

及规范要求。

同时,对主桥钢桁梁整体抗倾覆稳定性验算^[7-9],见表3。

表3 最不利工况下钢桁梁整体抗倾覆验算表

第四次顶推	抗倾覆长度/m	倾覆力矩/(kN·m)	抗倾覆力矩/(kN·m)	抗倾覆稳定系数
最大悬臂 49.8/m	37.01	428.97	75 815.11	1.77

方案中最不利工况下主桥钢梁整体抗倾覆稳定系数 $K=1.77>1.5$,满足规范要求(其它顶推工况抗倾覆稳定性验算也可参照验算)。

4 施工监控

根据设计文件和现场情况,需计算出桥梁的理

论线形数据和关键截面应力值,施工时监测各项数据并设置相应的预警值。如工况行程、结构变形、支点应力、施工荷载等。顶推过程监测^[14-18]工作主要包括以下方面:一是监控顶推过程临时支架的应力应变;二是监控顶推过程中钢桁梁各工况下控制截面的应力状态及线形状态;项目实施中对水中临时墩和上、下弦杆 $L/4$ 、 $L/2$ 截面作为应力控制监测断面(见图10)。

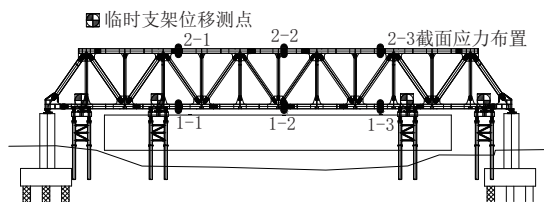


图10 监测点布置图

监测数据显示,顶推过程中主桥钢桁梁、顶推系统临时结构应力和应变均满足设计和规范要求;其中,顶推过程中,水中支墩最大竖向变形为 $2.72\text{ mm}\leq 7.5\text{ mm}$,水平最大位移 $36.3\text{ mm}\leq 72.5\text{ mm}$,第四次顶推工况,即导梁即将搭对上岸临时支架时,钢桁梁出现最大悬臂状态,此时为最不利工况,主桥钢桁梁(含钢导梁)前端局部出现最大应力和应变,最大应力 $126.3\text{ MPa}\leq 215\text{ MPa}$,最大变形值 $47\text{ mm}\leq 126.3\text{ mm}$ 。

5 结语

城建交通桥梁改建中受限空间是建设中的施工难点,也关系到结构和通行安全。钢桁梁分节段步履式顶推施工关键技术,可适用于施工场地极端受限的工程,施工中应重点关注大临设施中如水中支架等受力复杂结构的应力和变形情况,同时还需做好桥梁主体整体结构的稳定和局部挠曲变形的验算。

参考文献:

- [1] 姚超,王泽勇,吕林,等.城市狭小空间钢结构桥梁整幅顶推施工技术[J].建筑技术开发,2025,52(10):129-132.
- [2] 刘强华.大跨度、大重量斜靠式系杆拱桥浮拖法施工技术研究[J].铁道建筑技术,2016(2):5-8.
- [3] 葛炜.受限空间下大跨度钢结构人行天桥施工技术研究[J].绿色建筑,2022,14(6):84-86.
- [4] R.Chacón, R. Zorrilla. Structural Health Monitoring in Incrementally Launched Steel Bridges: Patch Loading Phenomena Modeling[J]. Automation in Construction, 2015, 58: 60-73.
- [5] 周波,黄海清,蒋博林,等.跨城市快速路钢箱梁顶推施工关键技术研究[J].山西建筑,2024,50(22):145-148.
- [6] 李敏.公路桥梁工程中钢箱梁顶推的施工技术[J].建筑技术开发,2022,49(16):137-139.

(下转第375页)