

## 跨高速组合梁顶推施工中的关键技术研究

王 雄

(中铁五局集团有限公司,湖南长沙 410200)

**摘要:**为研究跨高速组合梁在顶推施工过程中的关键技术,以某单跨 60 m 的简支钢混组合梁工程为依托,针对顶推施工的主要难点,提出了一套能够保证施工精度和安全性的总体施工方案,具体包括施工工艺、纠偏方案、施工流程及步骤等内容。通过合理优化施工过程中的顶推工艺,详细分析了顶推施工中各个关键工况下结构部件的受力情况,重点探讨了组合梁顶推过程中可能出现的强度、刚度以及变形等问题,并对建成后的组合梁进行了相应的计算与分析。实际应用表明:所提出的总体施工方案能够保证施工安全和质量,组合梁在顶推过程中的性能指标均满足要求。本文结果可为提高跨高速组合梁顶推施工的安全性、效率和质量提供一定的理论指导和实用价值。

**关键词:**顶推施工;跨高速组合梁;总体施工方案;受力分析;技术研究

中图分类号:U448.27

文献标志码:A

文章编号:1673-8993(2025)02-0048-08

doi:10.13402/j.gcjs.2025.02.022

## Research on key technologies in jacking construction of composite beams across expressway

WANG Xiong

(China Railway NO. 5 Engineering Group Co., Ltd., Changsha 410200, Hunan, China)

**Abstract:** In order to study the key technologies in the jacking construction process of composite beams across expressway, a general construction plan that can ensure construction accuracy and safety is proposed based on a single-span 60 m simply supported steel-concrete composite beam project and the main difficulties of jacking construction. The plan specifically includes construction technology, correction plan, construction process and steps, etc. By rationally optimizing the jacking process during the construction process, the stress conditions of the structural components under various key working conditions during the jacking construction are analyzed in detail. The strength, stiffness and deformation problems that may occur during the jacking process of the composite beam are discussed in detail, and the corresponding calculations and analyses are carried out on the composite beams after completion. Practical application shows that the proposed overall construction plan can ensure construction safety and quality, and the performance indicators of the composite beam during the jacking process meet the requirements. The results can provide certain theoretical guidance and practical value for improving the safety, efficiency and quality of the jacking construction of composite beams across expressway.

**Key words:** jacking construction; composite beam across expressway; overall construction plan; force analysis; technical research

目前对于跨高速、道路、地铁、峡谷等桥下净空存在限制的情况,顶推施工作为一种常见的桥梁施工方法,近年来受到了广泛关注和研究<sup>[1-3]</sup>。随着桥梁跨径和荷载的增加,顶推施工对梁体结构的要

求也越来越高。钢主梁在顶推过程中需要承受来自支撑系统、临时荷载和自身重量等多种复杂荷载作用,因此如何确保梁体在施工过程中的稳定性和安全性成为研究重点之一<sup>[4-5]</sup>。顶推施工涉及大

收稿日期:2024-06-30

作者简介:王 雄(1989—),男,高级工程师,从事铁路、公路等设计与施工工作。

型机械设备、复杂的施工工艺和严格的施工环境要求,施工时风险很大,多种荷载以及外界环境都会对顶推施工的安全产生影响,同时支撑体系是否设计合理以及现场施工误差等因素,都对安全、效率和质量产生影响<sup>[6-7]</sup>。此外,顶推施工过程中的监测和控制也是一个关键问题。如何通过全面的监测和相应的技术手段对梁体的受力、变形等参数进行准确监测,并及时调整施工方案,是施工安全和质量的重要保障<sup>[8-9]</sup>。本文以某跨高速钢混组合梁工程为依托,针对顶推施工建设中的关键技术进行详细分析,以期类似工程提供一点参考。

## 1 工程概况

某横跨高速的单跨 60 m 简支钢混组合梁,主梁为等宽变高钢混组合梁。组合梁两端的梁高为 2.1 m,跨中梁高为 2.95 m,梁宽为 25 m,桥面混凝土板和钢结构采用栓钉连接。为保障交通采用顶推施工,最大顶推距离为 23.975 m,总顶推距离为 48 m。钢混组合主梁的结构如图 1 所示。

## 2 总体施工方案设计

### 2.1 概述

主梁采用“拼装-焊接-顶推滑移-落梁”的施工方式。在拼装平台上完成主梁节段焊接后进行顶推施工,往复循环施工工序,直至顶推完

成最终落梁。同时,为了确保顶推过程中主梁线形和设计一致,主梁竖曲线高度通过滑靴的高度进行调整,施工工艺如图 2 所示。

### 2.2 施工工艺

#### 2.2.1 施工工艺参数

钢主梁采用单点顶推方式,最大顶推重量为 700 t,具体参数如表 1 所示。

#### 2.2.2 钢主梁节段划分

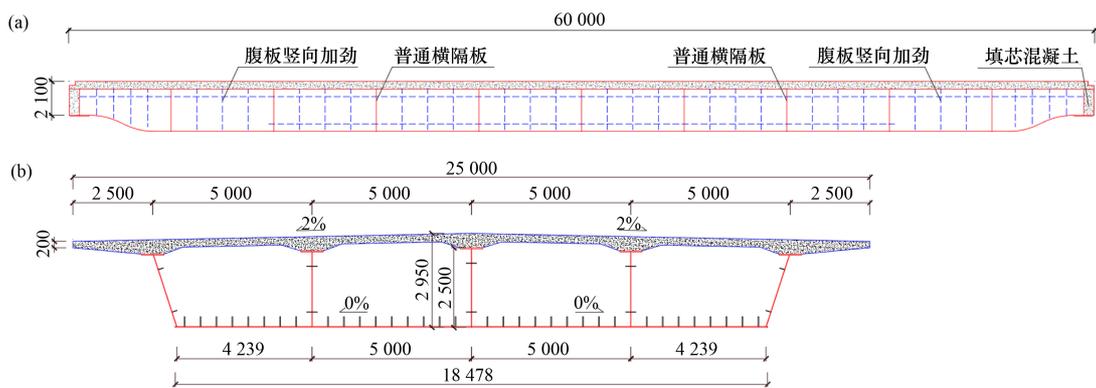
钢主梁采取工厂小节段焊接,现场拼装成横向大节段后通过吊装转运至拼装平台处。因此,钢主梁采用横向大节段划分形式,节段的划分长度为 5.42~6.50 m,主梁分段结构如图 3 所示。

#### 2.2.3 导梁

为降低结构的安全风险,同时更有利于顶推过程中的提前上墩,降低施工风险,钢主梁设前导梁。导梁采用工字钢,焊接在主梁上,全长 23 m,具体如图 4 所示。

#### 2.2.4 施工平台布置

施工场地需满足主梁拼装、临时设施杆件存放搭设、运输车辆和吊车作业等要求,整个存梁施工场地及进场便道需要提前进行平整、硬化。施工平台共分为拼装平台、滑移平台、接收平台 3 种形式。拼装、滑移、接收平台使用  $\varnothing 630 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  钢管支架,并利用柱间撑进行横纵联系,基础为扩大基础。轨道梁采用 H 型钢,规格为



(a) 立面; (b) 标准断面

图 1 组合梁的结构布置

mm

表 1 主梁顶推技术参数

| 顶推形式 | 顶推重量/t | 顶推速度 ( $\text{m} \cdot \text{h}^{-1}$ ) | 顶推总距离/m | 顶推理论用时/h | 顶推千斤顶         |      | 最大顶推跨径/m |
|------|--------|---|---------|----------|---------------|------|----------|
|      |        |   |         |          | 型号            | 套数/套 |          |
| 单点顶推 | 700    | 8                                       | 120     | 15       | DFQL-DT1500 型 | 2    | 23.975   |

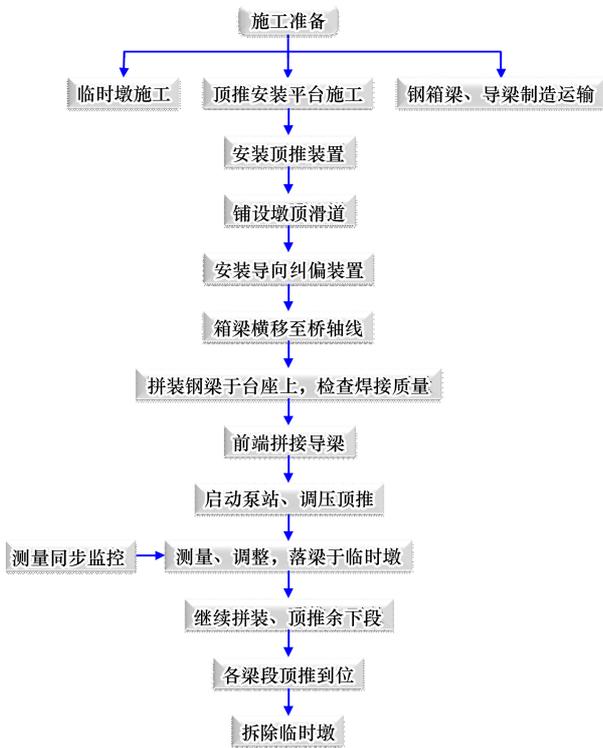


图 2 施工工艺流程图

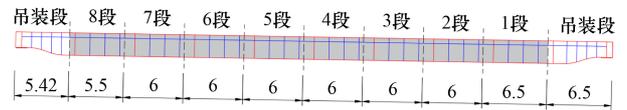


图 3 钢主梁分段示意

1 m × 0.5 m × 0.02 m × 0.024 m。轨道梁间设置槽钢系杆和水平撑, 轨道梁间距为 10 m。拼装平台、滑移平台道路竖曲线布置, 拼装滑移上方铺设 43 钢轨、路中及对向接收平台上方铺设四氟乙烯板。

### 2.2.5 滑移体系安装

(1) 基础构造。拼装、滑移平台支架使用扩展基础, 高速分隔带滑移平台基础及对向接收平台采用扩大基础。

(2) 临时支架构造。顶推、滑移、接收支架主管理由  $\varnothing 630 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的钢管组成, 腹杆为<sup>[22]</sup>, 柱顶采用 H600 mm × 500 mm × 20 mm × 30 mm 的横梁连接, 如图 5 所示。

(3) 滑轨和四氟乙烯板。现场施工时分段拼接滑移轨道, 如图 6 所示。轨道的安装精度是重

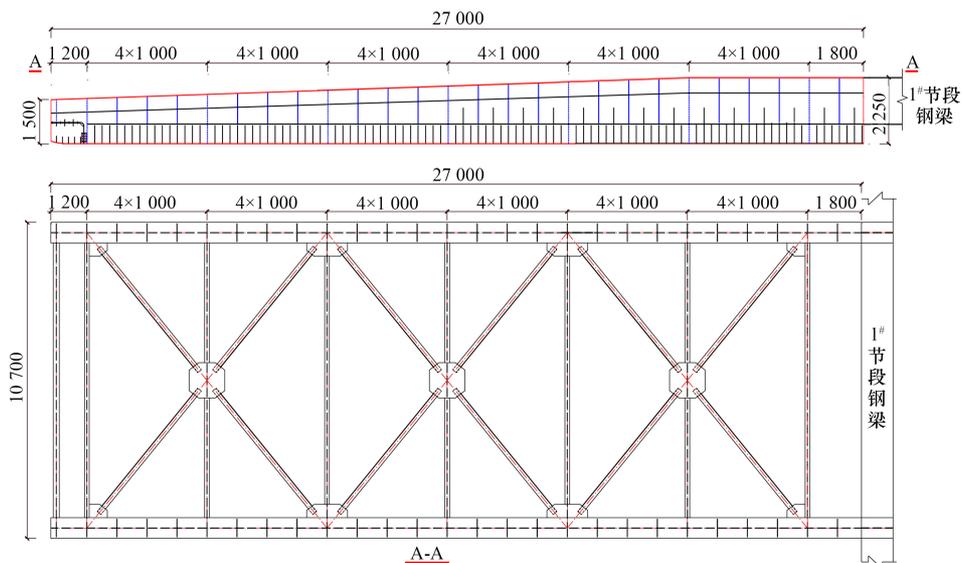


图 4 钢导梁示意

mm

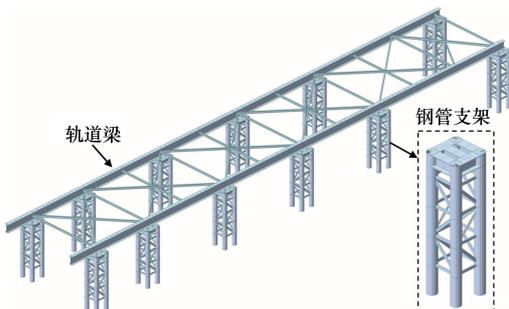


图 5 支架及轨道梁空间示意

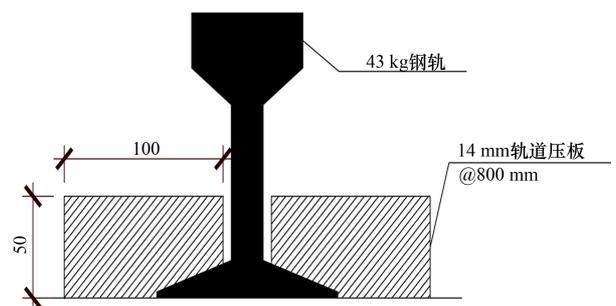


图 6 滑移轨道示意

mm

点控制的项目,同时为了降低摩阻力,在支架上铺设均匀涂满黄油的四氟乙烯板。

(4) 滑靴与钢梁底板连接。滑靴安装于主梁底面腹板下部,是主梁在轨道梁上行走的“脚板”,也是液压行走部的作用点,滑靴与底板焊接连接如图7所示。

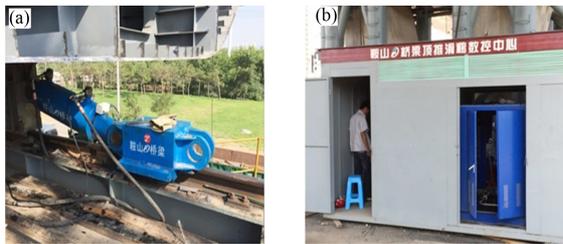


图7 滑靴与钢梁底板连接

### 2.2.6 顶推平台安装

在顶推临时支撑上用木质跳板搭设平台,在防护栏杆底部设置踢脚板,防止作业平台内螺栓、小型工具等落入平台外,威胁作业人员及行车安全。为了便于人员上下平台进行监控和操作,搭设爬梯式上下通道并设置警示标志。

根据计算,工程采用两台1500 kN 液压千斤顶进行顶推施工,同时准备两台作为备用。顶推过程中,滑靴均设置在腹板与横隔板交汇节点处,该处强度最大,经过计算,局部节点进行补强后完全可以满足顶推时的强度变形要求。顶推平台如图8所示。



(a) 顶推设备; (b) 控制中心

图8 顶推设备及控制平台

### 2.3 顶推纠偏方案

施工时应提前校核仪器和设备,确保设备的精度满足要求,减小顶推出现的偏差。当轴线偏差大于20 mm时,应及时采用千斤顶进行纠偏,纠偏装置如图9所示。

### 2.4 顶推滑移施工流程

施工时先组装顶推滑移平台,然后将钢主梁和导梁焊接拼装,同时开始分节段顶推施工,待顶推施工到位后拆除导梁,吊装拼接钢主梁的两端变高

段,最后落梁完成施工,施工流程如图10所示。

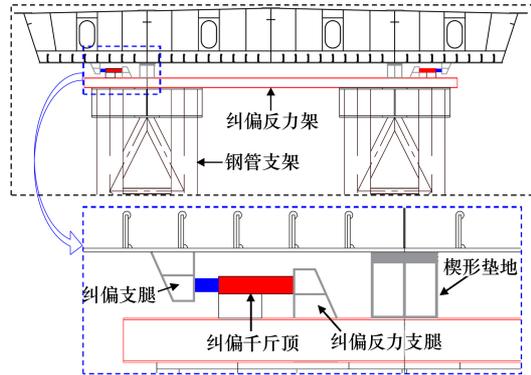


图9 纠偏构造示意

## 3 钢主梁顶推计算

### 3.1 计算模型

顶推模型采用Midas中杆系单元模拟,根据施工阶段的不同,分别激活或钝化相应的单元和边界,严格按照顶推阶段模拟,顶推时仅考虑1.2倍钢主梁自重,模型如图11所示。

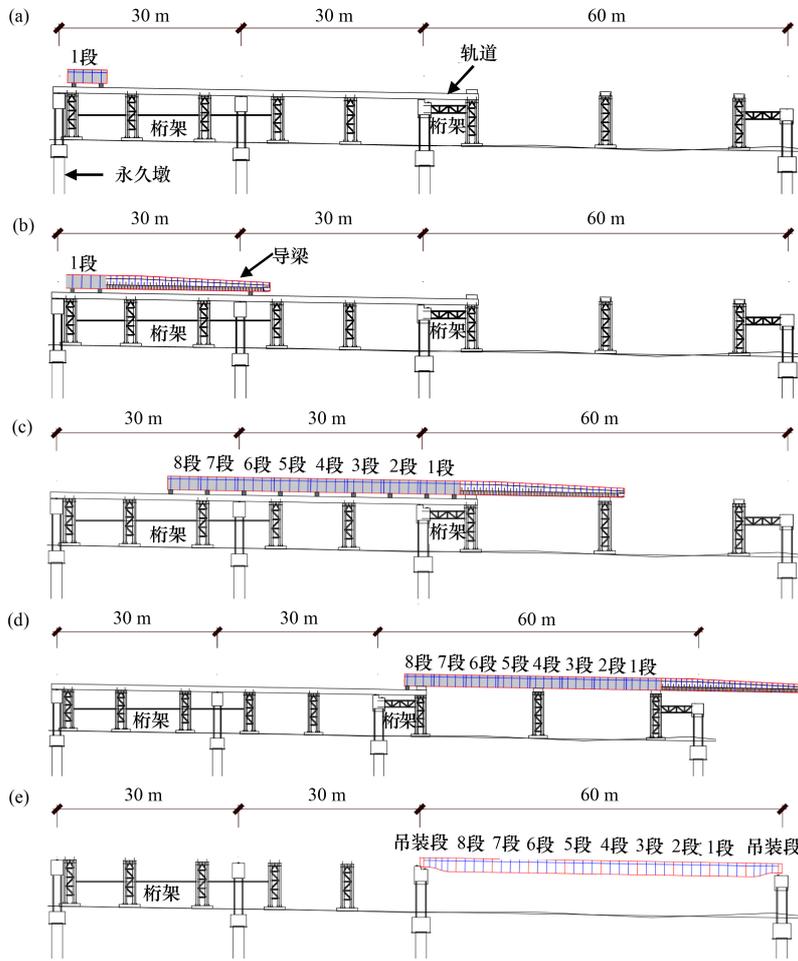
### 3.2 典型工况选取

通过对顶推过程的分析,考虑5种最不利工况进行结构分析,具体模型的结构体系和荷载工况如图12、13和表2所示。

### 3.3 受力结果分析

#### 3.3.1 导梁和钢主梁计算

导梁和钢主梁的计算结果汇总如表3所示。由表3可知:导梁在最大悬臂状态(工况1、2、4)下的负弯矩最大,导致其组合应力最大,为16 MPa;同时,剪力最大导致剪应力也最大,为2.7 MPa。因此,控制截面为与节段1接近的导梁端面。就挠度而言,导梁在工况2下的挠度最大,为14 mm。在工况4下,由于钢主梁的中间区域未约束,其自重会抵消部分导梁端部的变形,导梁的最大挠度只有7.4 mm。最不利情况下的计算结果如图14所示。由图14可知:钢主梁在工况5下的跨径最大,所以在5号支点产生的负弯矩也最大,导致在此处的组合应力最大,为17.1 MPa。同时,5号支点处的剪力也最大,故该处的剪应力也最大,为12.2 MPa。因此,控制截面为5号支点处的截面。钢主梁的最大挠度为4.3 mm,位于跨中的3号支点处。上述导梁和钢主梁的挠度、组合应力和剪应力均能满足要求。



(a) 平台组装; (b) 滑靴、主梁首节段安装; (c) 开始顶推; (d) 顶推到位; (e) 支架拆除

图 10 顶推施工示意

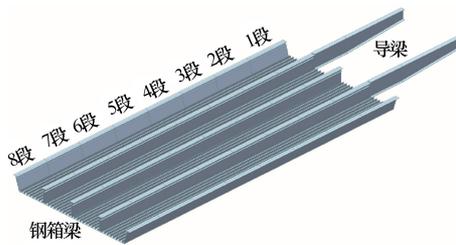


图 11 顶推有限元模型

由此可见，对于导梁而言，在顶推过程中的最不利工况为工况 2，即主梁节段 1 和导梁处于最大悬臂状态，应重点关注，控制截面为与节段 1 接近的导梁端面。对于钢主梁而言，在顶推过程中的最不利工况为工况 5，即顶推就位拆除导梁

时，控制截面为 5 号支点处的截面。

### 3.3.2 支架及轨道梁计算

(1) 钢管支架。考虑的荷载主要为钢主梁和导梁的自重，并将顶推模型中计算的支反力作为外荷载施加。具体计算结果如表 4 所示。由表 4 可知：钢管柱顶梁的最大剪应力和组合应力分别为 92.7、93.5 MPa；钢管柱连接系的最大剪应力和组合应力分别为 108.7、112.9 MPa，均小于 Q235 的容许应力，满足强度要求。此外，钢管支架的一阶稳定系数为 54.4，稳定性满足要求。

(2) 轨道梁。经计算，轨道梁的最大剪应力和组合应力分别为 32、143.1 MPa，均小于 Q235

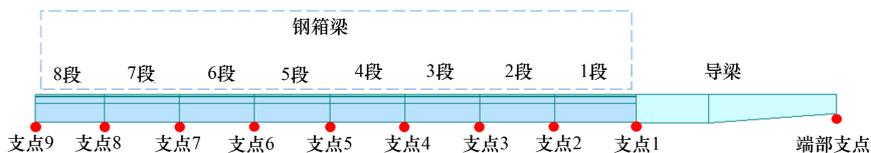
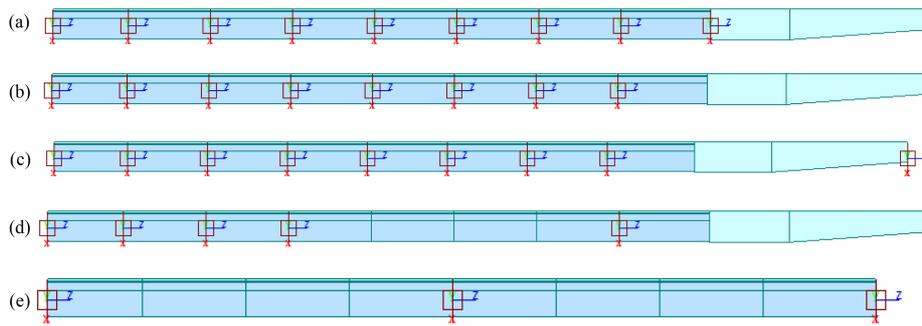


图 12 顶推有限元模型节段编号示意



(a) 工况 1：导梁最大悬臂工况；(b) 工况 2：主梁 + 导梁最大悬臂工况；(c) 工况 3：导梁刚搭上中间临时支墩；(d) 工况 4：主梁 + 导梁尚未搭上接收支墩；(e) 工况 5：顶推就位拆除导梁

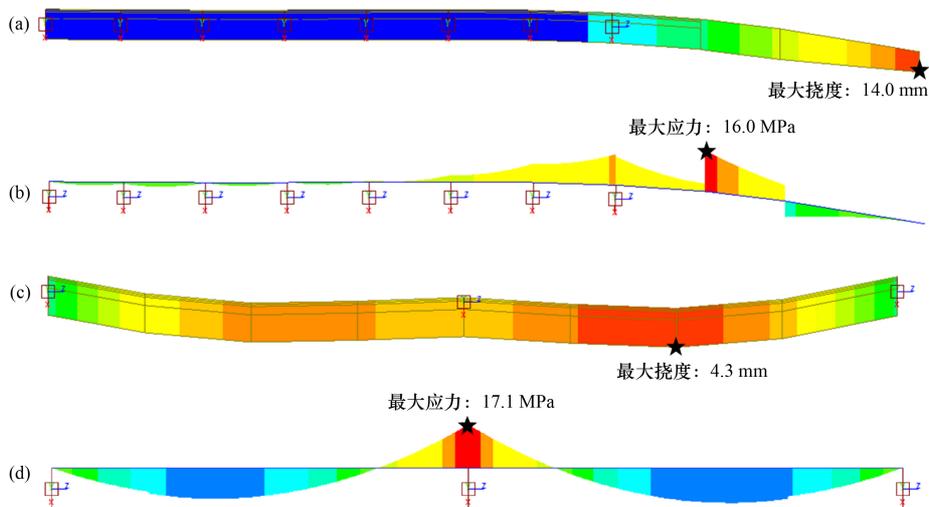
图 13 典型工况示意

表 2 工况条件分析汇总

| 工况   | 阶段              | 荷载 | 边界条件                  |
|------|-----------------|----|-----------------------|
| 工况 1 | 导梁最大悬臂          | 自重 | 钢主梁支点 1 ~ 9 约束        |
| 工况 2 | 主梁 + 导梁最大悬臂     | 自重 | 钢主梁支点 2 ~ 9 约束        |
| 工况 3 | 导梁刚搭上中间临时支墩     | 自重 | 钢主梁支点 2 ~ 9 及导梁端部支点约束 |
| 工况 4 | 主梁 + 导梁尚未搭上接收支墩 | 自重 | 钢主梁支点 2, 6 ~ 9 约束     |
| 工况 5 | 顶推就位拆除导梁        | 自重 | 钢主梁支点 1, 5, 9 约束      |

表 3 不同工况下导梁和钢主梁计算结果汇总

| 工况   | 导梁    |          |         | 钢主梁   |          |         |
|------|-------|----------|---------|-------|----------|---------|
|      | 挠度/mm | 组合应力/MPa | 剪应力/MPa | 挠度/mm | 组合应力/MPa | 剪应力/MPa |
| 工况 1 | 5.7   | 16.0     | 2.7     | 0.7   | 1.6      | 2.8     |
| 工况 2 | 14.0  | 16.0     | 2.7     | 3.6   | 12.2     | 4.8     |
| 工况 3 | 2.5   | 8.0      | 2.6     | 2.1   | 5.8      | 3.6     |
| 工况 4 | 7.4   | 16.0     | 2.7     | 3.6   | 12.2     | 10.6    |
| 工况 5 | —     | —        | —       | 4.3   | 17.1     | 12.2    |



(a) 导梁挠度分布图 (工况 2)；(b) 导梁组合应力分布图 (工况 2)；  
(c) 钢主梁挠度分布图 (工况 5)；(d) 钢主梁组合应力分布图 (工况 5)

图 14 导梁和钢主梁的计算结果

表 4 钢管支架应力汇总 MPa

| 部位     | 剪应力   | 组合应力  |
|--------|-------|-------|
| 圆钢管柱   | —     | 99.1  |
| 钢管柱顶梁  | 92.7  | 93.5  |
| 钢管柱连接系 | 108.7 | 112.9 |

的容许应力,满足强度要求。轨道梁的最大竖向位移为 10.1 mm,其容许最大竖向位移为  $12\ 000/500 = 24$  mm,故刚度满足规范要求。此外,轨道梁的一阶稳定系数为 7.2,其稳定性满足要求。

### 4 钢混组合梁成桥验算

#### 4.1 计算模型

建立主梁的有限元模型,边界按照成桥状态模拟,荷载包括恒载、温度荷载以及移动荷载等。采用软件中联合截面以模拟组合梁横断面,模型如图 15 所示。

#### 4.2 抗弯承载力验算

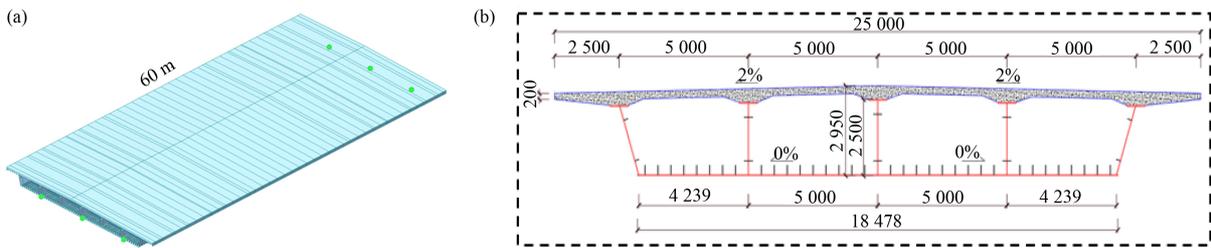
基本组合下的内力和应力包络图如图 16、17

所示。根据《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG D64 - 01—2015),由图 16 可知:基本组合作用下,跨中最大正弯矩为 394 921 kN·m。由图 17 可知:基本组合下 C50 桥面板上缘最大压应力  $\sigma_1$  为 7.45 MPa, Q345 钢梁上缘最大压应力  $\sigma_2$  为 184.7 MPa。

结构重要性系数  $\gamma_0$  取 1.1,则对于混凝土桥面板: $\gamma_0\sigma_1 = 1.1 \times 7.45 = 8.2$  MPa  $< f_{cd} = 22.4$  MPa ( $f_{cd}$  为混凝土的抗压强度设计值,MPa);对于钢梁: $\gamma_0\sigma_2 = 1.1 \times 184.7 = 203.2$  MPa  $< f_d = 270$  MPa ( $f_d$  为抗压、抗拉强度设计值,MPa),故主梁跨中正弯矩抗弯承载能力满足规范要求。

#### 4.3 竖向抗剪承载力计算

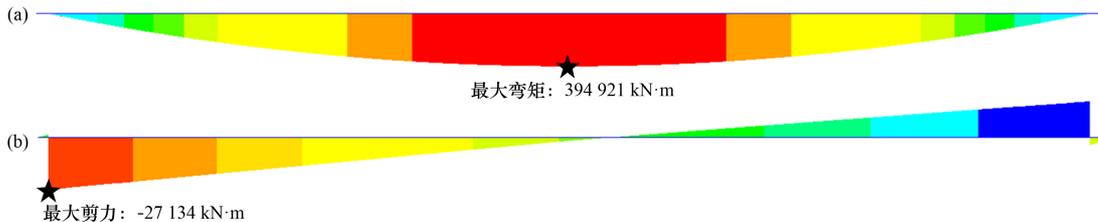
(1) 根据 JTG D64 - 01—2015,基本组合作用下组合梁截面的最大剪力设计值  $V_{vd}$  如图 16 所示,为 27 133.7 kN。支点钢梁腹板面积为 175 000 mm<sup>2</sup>,钢梁腹板的抗剪强度设计值(Q345, 14 mm)为 175 MPa,组合梁的竖向抗剪承载力  $V_{vu}$  为 30 625 kN。



(a) 有限元模型; (b) 模型横断面

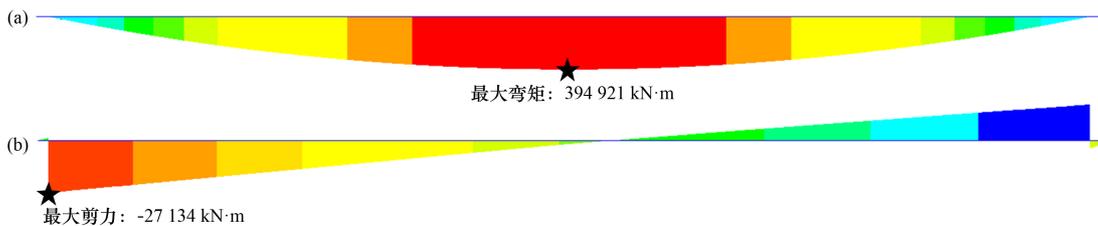
图 15 组合梁有限元模型

mm



(a) 正弯矩; (b) 剪力图

图 16 基本组合下内力包络图



(a) 桥面板压应力; (b) 钢梁上缘应力; (c) 钢梁下缘应力

图 17 基本组合下应力包络图

结构重要性系数取 1.1, 则  $\gamma_0 V_{vd} = 1.1 \times 27\ 133.7 = 29\ 847.07\ \text{kN} < V_{vu} = 30\ 625\ \text{kN}$ 。由此可知, 组合梁竖向抗剪承载力满足规范要求。

(2) 根据 JTG D64-01-2015, 折算应力计算式:

$$\sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \leq 1.1f_d \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为弯曲正应力, MPa;  $\tau$  为剪应力, MPa。

最不利位置处的剪应力:

$$\tau = \frac{V_{vd}}{h_w t_w} = \frac{27\ 133.7 \times 10^3}{2\ 500 \times 14 \times 5} = 155.05\ \text{MPa} \quad (2)$$

式中:  $h_w$  为钢腹板高度, mm;  $t_w$  为钢腹板厚度, mm, 本文取 14 mm。

考虑最不利情况, 即最大正应力与最大剪应力同时出现在同一位置, 则有

$$\sqrt{184.7^2 + 3 \times 155.05^2} = 325.9\ \text{MPa} \leq 1.1f_d = 1.1 \times 305 = 335.5\ \text{MPa}$$

结合图 16、17 可知, 剪应力最大的支点位置处由弯矩产生的弯曲正应力很小, 而在弯曲正应力最大的跨中位置处由剪力产生的剪应力又很小, 故钢梁腹板折算应力能满足规范要求。

#### 4.4 挠度验算

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64-2015), 车载作用下组合梁的最大挠度为  $14.96\ \text{mm} \cdot l/500$  ( $l$  为跨径, mm) = 120 mm, 桥梁的刚度满足规范要求。

## 5 结 论

(1) 跨高速顶推属于特殊工艺, 需事先拟定总体的施工方案, 尤其包括施工工艺、顶推纠偏方案、顶推滑移施工流程及步骤等, 其中施工工艺环节应重点关注工艺参数和滑移体系的安装。

(2) 顶推施工过程中, 导梁的最不利工况为

工况 2, 控制截面为与节段 1 接近的导梁端面, 其最大组合应力为 16 MPa, 最大挠度为 14 mm。钢主梁的最不利工况为工况 5, 控制截面为 5 号支点处的截面, 其最大组合应力为 17.1 MPa, 最大挠度为 4.3 mm。顶推过程中, 各指标均能满足设计与施工要求。

(3) 成桥后, 基本组合下混凝土桥面板的最大压应力为 7.45 MPa, 钢梁的最大应力为 184.7 MPa, 钢梁腹板的最大折算应力为 325.9 MPa。组合梁的抗弯、抗剪承载力以及挠度均满足规范要求。

## 参考文献:

- [1] 范翔, 郁志刚, 徐新华. 跨沪宁高速公路钢箱梁顶推施工技术[J]. 城市道桥与防洪, 2012(4): 149-153; 277.
- [2] 廖应先, 达勇. 小半径大坡度连续钢箱梁顶推施工分析[J]. 湖南交通科技, 2016, 42(3): 142-145.
- [3] 陈海珊, 黄胜明, 关永强, 等. 跨既有高速公路的钢箱梁顶推施工技术研究[J]. 工程技术研究, 2023, 8(22): 62-64.
- [4] 贺坤龙, 许伟, 屠永华, 等. 某单跨砼筒支梁顶推施工法优化分析[J]. 湖南交通科技, 2019, 45(4): 98-100.
- [5] 冯四超. 简支钢主梁逐幅“顶推+横移”上跨高速公路施工技术[J]. 城市建筑, 2021, 18(11): 176-179.
- [6] 姜大欢, 桂水荣, 肖长柏, 等. 连续梁拱桥斜坡预制变坡多点同步顶推施工关键技术研究[J]. 公路, 2024, 69(4): 88-95.
- [7] 范红波, 傅中秋, 刘锦军, 等. 钢箱梁横隔板优化布置对顶推施工力学性能的影响分析[J]. 施工技术(中英文), 2024, 53(12): 64-70; 106.
- [8] 范鹏, 李志成. 钢桥顶推施工整体受力分析[J]. 科技与创新, 2024(6): 115-117.
- [9] 胥奇, 卢涛. 大高差变底高钢箱梁桥的顶推过程分析[J]. 中国水运(下半月), 2024(3): 107-109.