

钢槽梁顶推施工过程受力分析

缪钟毅 文定旭

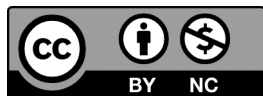
中交武汉港湾工程设计研究院有限公司，武汉

摘 要 | 对桥梁主梁的施工工序包括钢梁施工、桥面板施工、湿接缝施工，钢梁施工可采用悬臂拼装、支架拼装或顶推施工，现场根据施工环境、工期要求等进行合理选择。跨越河流或既有线路的桥梁，受条件限制可选择的施工方法有限，悬臂拼装及支架拼装钢梁安装持续时间较长，现场难以实现，因而采用顶推施工，先以胎架拼装钢梁，连续顶推现场环境影响降低。对顶推全过程结构的受力进行了分析，可供类似工程借鉴。

关键词 | 顶推；桥梁；强度

Copyright © 2022 by author (s) and SciScan Publishing Limited

This article is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>



1 桥梁概况

本项目起止桩号 K137+148 ~ K138+980.312，主桥桥跨布置为 $(70+2 \times 180+70)$ m 四跨连续中承飞燕式钢桁拱桥，东涉水引桥 4×63 m、西涉水引桥 5×63 m 钢—混组合钢梁，岸上引桥 $(24+26.5+32.5+28)$ m 变截面钢梁、 $(3 \times 30+3 \times 30+3 \times 30+3 \times 30+4 \times 30)$ m 预应力砼预制小钢梁。全长 1.832312 km。西引桥钢梁总重约 2530 t，桥面板重约 5000 t。

作者简介：缪钟毅（1994-），男，硕士研究生，助理工程师，主要从事桥梁专用装备及工艺设计。

文章引用：缪钟毅，文定旭. 钢槽梁顶推施工过程受力分析 [J]. 土木工程进展，2022，4（3）：1-12.

<https://doi.org/10.35534/ace.0403001>

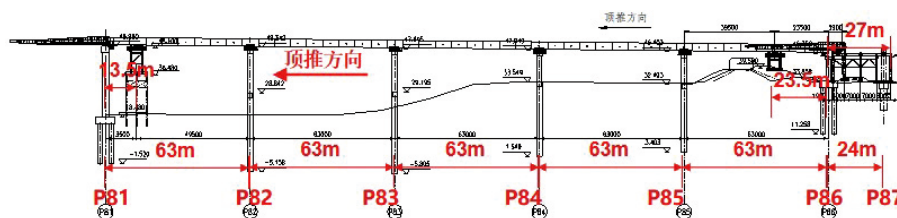


图 1 暮坪桥西引桥钢梁顶推施工总图

Figure 1 General view of the steel girder jacking construction of the west approach bridge of Muping Bridge

2 计算荷载

暮坪桥钢梁采用现场整节段吊装安装工艺，顶推过程主要载荷有以下几个部分。

(1) 钢梁自重荷载

结构使用结构离散分析软件按梁单元整体建模，结构尺寸参数及重量与钢梁设计图纸一致，计算时自重考虑 1.3 倍系数。

(2) 导梁自重荷载

根据导梁设计图纸，导梁总重为 73 t，考虑 1.3 倍载荷分项系数。

(3) 风荷载

本计算中，对于顶推过程中钢梁及导梁最大位移，按载荷设计标准值进行计算；对于支反力和钢梁应力，按照极限应力法进行计算。

3 工况总体计算

运用有限元软件 ANSYS 建立桥梁顶推施工模型，分别运用梁单元 beam188 单元对钢梁和导梁进行模拟。根据顶推过程选择对应的梁段单元进行分析计算。

边界条件为：钢梁在尾端支点位置施加三自由度位移约束，其他支点位置均施加竖向位移约束。

由于工况较多，本文只截图仅示意载荷和反力较大的控制工况。

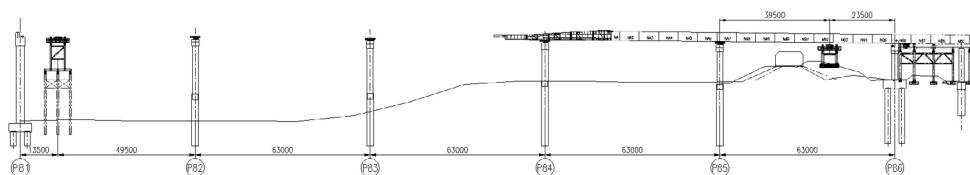


图 2 钢梁顶推施工计算模型

Figure 2 Steel beam jacking construction calculation model

3.1 工况 1 计算分析

工况 1: 拼装完 15~17 节段之后, 继续顶推 15 m, 计算导梁和钢梁的受力、变形和支反力。



计算荷载:

钢梁自重 (模型中自动计入), 导梁自重 (模型中自动计入);

风荷载: $w_k=0.38 \text{ kN/m}^2$;

计算模型和结果如图 3、图 4 所示。

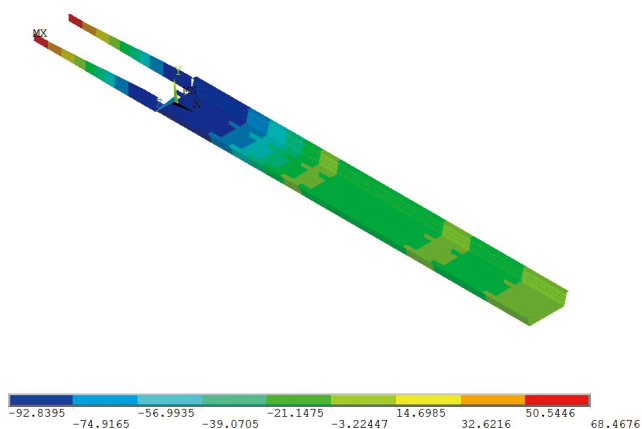


图 3 工况 1 总体 Y 方向位移云图

Figure 3 Y-Component of displacement for working condition1

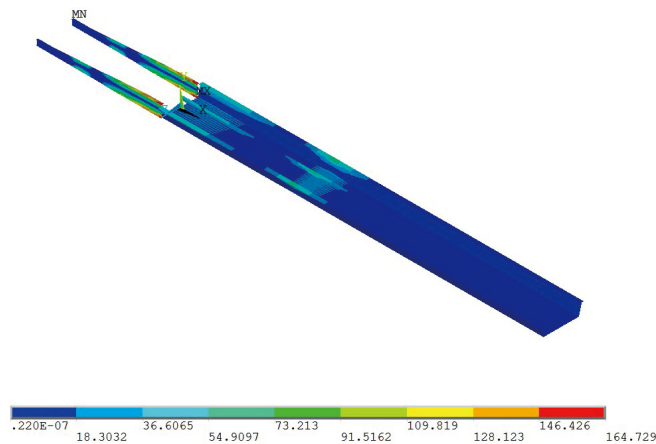


图 4 工况 1 总体综合应力云图

Figure 4 Von Miss Stress for working condition 1

由有限元计算可知，钢梁总体最大应力 $\sigma_{\max}=62.2\text{MPa}<f=295\text{MPa}$ ，钢梁最大应力出现在 P85# 墩顶推设备支撑处；导梁最大应力 $164.7\text{MPa}<f=290\text{MPa}$ ，导梁最大应力出现在导梁与钢梁连接处，导梁最大竖向位移 -91.1 mm ，故钢梁应力满足顶推要求。工况 1 顶推各支点反力见表 1。

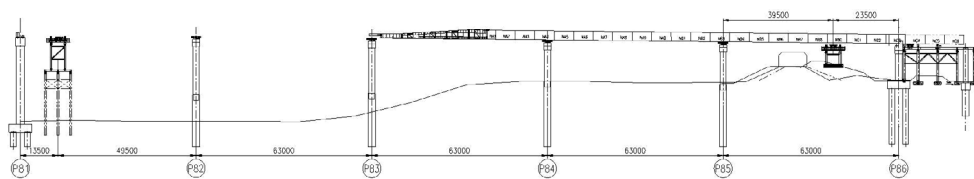
表 1 工况 1 顶推各支点支反力（两个点总反力）

Table 1 Work condition 29 thrust each pivot point support reaction force (two points total reaction force)

支反力位置	顶推设备 4 (P85# 桥墩)	顶推设备 3 (临时墩 1)	顶推设备 2 (拼装平台 -1200t)	顶推设备 1 (拼装平台 -300t)
支反力 (kN)	6007	3100	1640	/
支反力位置	顶推设备 5 (P84# 桥墩)	顶推设备 6 (P83# 桥墩)	顶推设备 7 (P82# 桥墩)	顶推设备 8 (临时墩 2)
支反力 (kN)	1936	/	/	/

3.2 工况 2 计算分析

工况 2：顶推 5.8 m，共计顶推 20.8 m，导梁头部到达 P83# 墩，此时钢梁处于最大悬臂状态，计算导梁和钢梁的受力、变形和支反力。



计算荷载:

钢梁自重 (模型中自动计入), 导梁自重 (模型中自动计入);

风荷载: $w_k=0.38 \text{ kN/m}^2$;

计算模型和结果如图 5、图 6 所示。

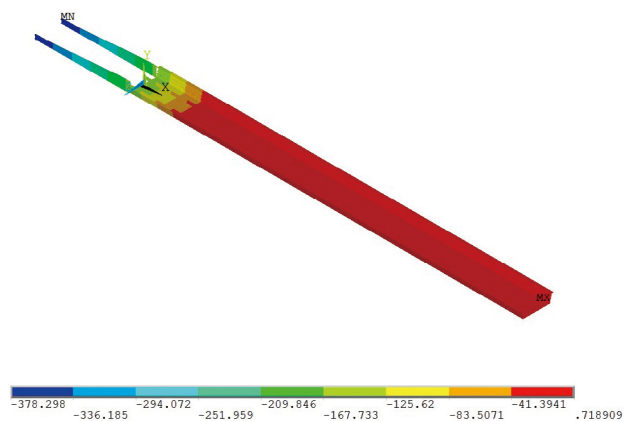


图 5 工况 2 总体 Y 方向位移云图

Figure 5 Y-Component of displacement for working condition 40

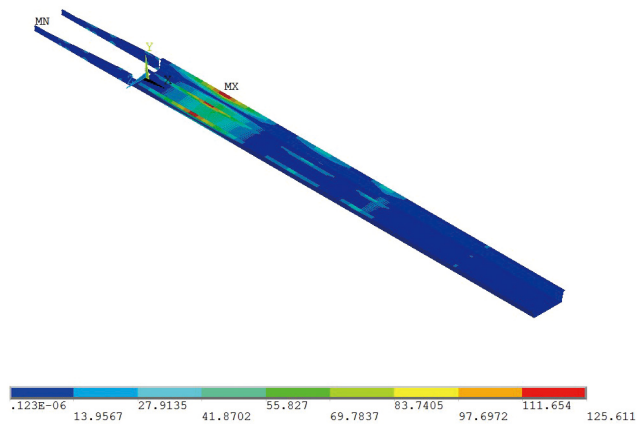


图 6 工况 2 总体综合应力云图

Figure 6 Von Miss Stress for working condition 40

由有限元计算可知，钢梁总体最大应力 $\sigma_{\max}=125.6\text{MPa}<f=295\text{MPa}$ ，钢梁最大应力出现在 P84# 墩顶推设备支撑处；导梁最大应力 $65.5\text{MPa}<f=290\text{MPa}$ ，导梁最大应力出现在导梁中部，导梁头部的最大竖向位移为 -378.3 mm ，故钢梁应力满足顶推要求。工况 2 顶推各支点反力见表 2。

表 2 工况 2 顶推各支点支反力（两个点总反力）

Table 2 Work condition 40 thrust each pivot point support reaction force (two points total reaction force)

支反力位置	顶推设备 4 (P85# 桥墩)	顶推设备 3 (临时墩 1)	顶推设备 2 (拼装平台 -1200t)	顶推设备 1 (拼装平台 -300t)
支反力 (kN)	4643	3847	1117	/
支反力位置	顶推设备 5 (P84# 桥墩)	顶推设备 6 (P83# 桥墩)	顶推设备 7 (P82# 桥墩)	顶推设备 8 (临时墩 2)
支反力 (kN)	7720	/	/	/

3.3 主要电算结果汇总

计算情况说明：

（1）计算仅将结构作为钢结构件考虑，计算未考虑线型、误差、温度等影响；

（2）临时墩结构设计和计算中，未考虑后期温度、活动载荷位置变化等因素，对后期桥面板施工及湿接缝施工等工序质量的影响。

由计算可知，顶推过程中，导梁最大应力为 $\sigma_{\max}=164.7\text{MPa}<\sigma=295\text{MPa}$ ，强度满足要求；钢梁最大应力 $\sigma_{\max}=125.6\text{MPa}<\sigma=295\text{MPa}$ ，满足强度要求。

4 部件计算

4.1 钢梁腹板稳定性计算

根据计算，取设备出现最大反力 $F=7720\text{ kN}$ ，进行钢梁中腹板稳定性复核。顶推设备接触面为顺桥向 $a=1300\text{ mm}$ 。查看的有限元模型可得，弯矩可得最大断面弯矩 $M=6.72 \times 10^{10}\text{ N} \cdot \text{mm}$ ，断面总的剪力 $F_y=3.86 \times 10^4\text{ N}$ 。

钢梁标准断面斜腹板最薄厚度为 22 mm, 顶板最薄厚度为 24 mm, 底板最薄厚度为 18 mm。

最大的弯曲压应力 $\sigma = M/W = 6.72 \times 10^{10} / 832407185 = 80.7 \text{ MPa}$

顶推钢梁时, 钢梁下翼缘受压, 上翼缘受拉, 当顶推设备处于钢梁相邻两块横隔板之间时, 腹板受力最危险。根据钢梁截面参数计算可知, 腹板截面的拉压分界线与顶板距离值为 2136 mm。则上 (A), 中 (B), 下 (C) 的三个区格的受力状态分别为纯拉、拉压及纯压。

4.2 受压翼缘与纵向加劲肋之间的区格计算

根据《钢结构设计标准》第 6.3.4 条, 在受压翼缘与纵向加劲筋之间设有短加劲筋的区格, 其局部稳定性按照下式计算:

$$\frac{\sigma}{\sigma_{cr1}} + \left(\frac{\tau}{\tau_{cr1}} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{c, cr1}} \right)^2 \leq 1$$

式中:

σ 为所计算腹板区格内, 由平均弯矩产生的腹板计算高度边缘的弯曲压应力, 根据总体计算, $\sigma = 80.7 \text{ MPa}$;

τ 为所计算腹板区格内, 由平均剪力产生的腹板平均剪应力, 应按:

$$\tau = \frac{V}{h_w t_w} = \frac{3860000}{3300 \times 22} = 53.2 \text{ MPa}$$

σ_c 为腹板计算高度边缘的局部压应力;

$$\sigma_c = \frac{F}{t_w l_z} = \frac{7720000}{22 \times 1380 \times 2} = 127.1 \text{ MPa}$$

其中: l_z 为集中载荷在腹板计算高度上边缘的假定分布长度,

$$l_z = a + 5h_y + 2h_R = 1300 + 5 \times 16 + 0 = 1380 \text{ mm}$$

a 为载荷沿梁跨度方向的支撑长度, $a = 1300 \text{ mm}$;

σ_{cr1} , τ_{cr1} , $\sigma_{c, cr1}$ 为各种应力单独作用下的临界应力, 按规范方法计算。

h_l 为纵向加劲肋至腹板计算高度受压边缘的距离 1000 mm;

t_w 为腹板厚度, 22 mm;

a 为横隔板间距 3500 mm;

η 简支梁取 1.11;

(1) σ_{cr1} 按下列公式计算:

当梁受压翼缘扭转受到约束时:

$$\lambda_{rb1} = h_1 \cdot \frac{1}{75 \cdot t_w \cdot \varepsilon_k} = 0.735$$

当: $\lambda_{nb1} \leq 0.85$

$$\sigma_{cr1} = f = 290 \text{ MPa}$$

(2) τ_{cr1} 按下列公式计算:

当 $\frac{a}{h_1} = 3.5 > 1$ 时:

$$\lambda_{ns1} = \frac{\frac{h_1}{t_w}}{37 \cdot \eta \cdot \sqrt{5.34 + 4 \cdot \left(\frac{h_1}{a}\right)^2}} \cdot \frac{1}{\varepsilon_k} = 0.502 \leq 0.8$$

则:

$$\tau_{cr1} = f_v = 165 \text{ MPa}$$

4.3 导梁稳定性计算

导梁在受力情况最不利时导梁整体受到的剪力为 871kN, 弯矩为 1150kN · m。

考虑 1.2 倍不平衡系数, 顶推设备接触面为顺桥向 1300 mm × 横桥向 600 mm, 根据导梁腹截面参数可知。

导梁在最大主刚度平面内受弯, 其整体稳定性应满足:

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_x f} < 1$$

因为截面宽厚比等级为 S5, W_x 应取为有效截面模量, 对于均匀受压翼缘外伸距宽度取为 $15 \varepsilon_k t$, 腹板截面部分受拉, 有效宽度即为腹板宽度。则:

$$W_x = 137551500 \text{ mm}^3$$

有效支撑长度为 16.5m, 计算得

$$\frac{M_x}{\varphi_{b1} W_x f} = \frac{1.15 \times 10^9}{0.91 \times 8138074 \times 295} = 0.53 < 1, \text{ 整体稳定性满足要求。}$$

4.4 导梁稳定性计算导梁根部与钢梁连接处计算

4.4.1 导梁根部与钢梁连接板单元局部计算

运用有限元软件 ANSYS 建立钢梁与导梁的局部有限元模型，对钢梁及导梁采用 shell63 及 beam188 单元进行模拟，有限元模型如图 7 所示。

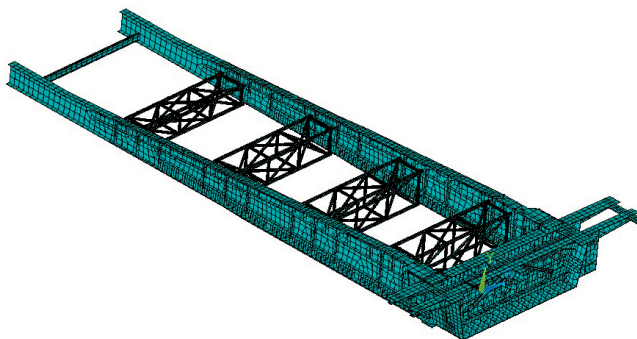


图 7 钢梁有限元模型

Figure 7 Finite element model of steel beam

根据计算结果，当梁体处于最大跨位置工况 1，且最前方设备位于导梁中部附近位置时，导梁根部处于最不利受力状态。

根据建立的有限元模型，导梁根部及钢梁连接处的应力云图如图 8 所示。

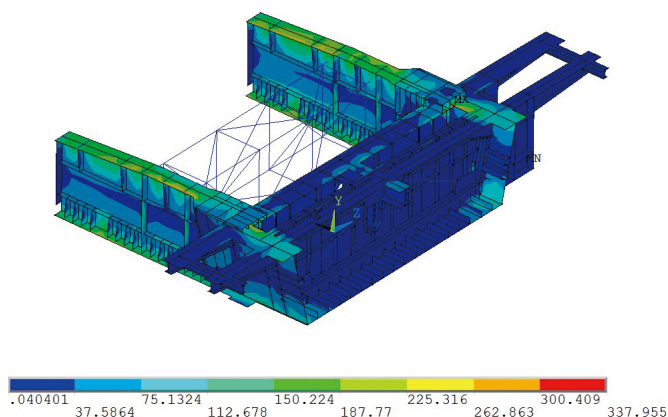


图 8 导梁根部及钢梁头部应力云图

Figure 8 Von Miss Stress at the root of the guide beam and the head of the steel beam

根据计算结果显示, 钢梁上顶板连接处最大应力 338MPa, 应力集中较大。故在顶板处加如图 9 所示的筋板进行局部加强。

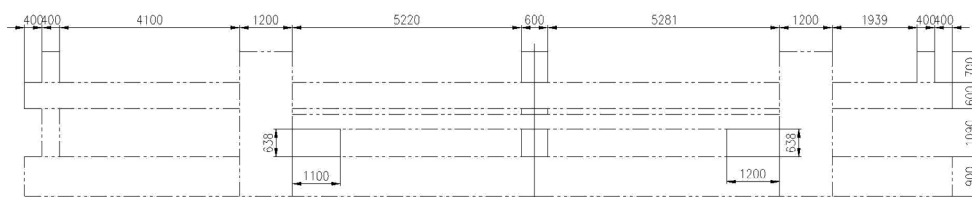


图 9 钢梁局部加强示意图

Figure 9 Schematic diagram of partial strengthening of steel beams

钢梁局部加强后, 梁根部及钢梁连接处的应力云图如图 10 所示。

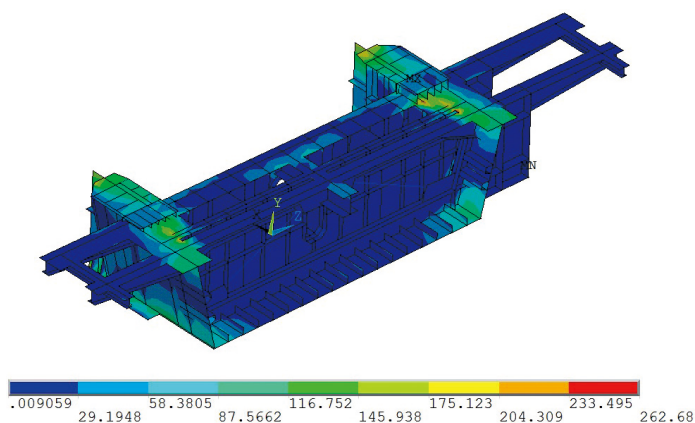


图 10 钢梁局部加强后导梁根部及钢梁局部应力云图

Figure 10 Von Miss Stress at the root of guide beam and steel beam after partial strengthening of steel beam

根据计算结果显示, 进行局部加强后, 钢梁最大应力 263MPa, 结构强度满足要求。

4.4.2 导梁根部与钢梁连接筋板焊缝强度计算

根据有限元计算结果, 提取导梁根部最大弯矩为 $1.15 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}$, 导梁根部下翼缘拉力 (上翼缘压力) 为

$$N = \frac{M}{l} = \frac{1.15 \times 10^7}{3500} \text{ kN} = 3285.71 \text{ kN}$$

导梁根部上翼缘与钢槽梁连接筋板抗压强度为:

$$f = \frac{N}{A} = \frac{3285710}{4 \times 167 \times 12 + 3420 \times 20} \text{ MPa} = 43 \text{ MPa} < 305 \text{ MPa}$$

根据《钢结构设计标准》(GB50017-2017)中 11.2.2-1, 直角角焊缝在通过形心的剪力作用下, 侧面角焊缝(作用力平行于焊缝长度方向)强度计算:

$$\tau_f = \frac{N}{h_e l_w}$$

式中:

τ_f 为按焊缝有效截面计算, 沿焊缝长度方向的剪应力 (N/mm^2);

h_e 为直角角焊缝的计算厚度, 当两焊件间隙 $b \leq 1.5 \text{ mm}$ 时, $h_e = 0.7h_f$, h_f 为焊脚尺寸;

l_w 为角焊缝的计算长度 (mm), 对每条焊缝取其实际长度减去 $2h_{f0}$

导梁根部上翼缘与钢桁梁连接筋板与型钢的焊缝强度为:

$$\tau_f = \frac{N}{h_e l_w} = \frac{3285710}{8 \times 0.7 \times 12 \times (794 - 2 \times 12)} \text{ MPa} = 63.5 \text{ MPa} < f_f^w = 160 \text{ MPa}$$

导梁根部下翼缘与钢槽梁连接对接焊缝强度计算满足使用要求。

$$\tau_f = \frac{N}{h_e l_w} = \frac{3285710}{0.7 \times 30 \times (1270 - 2 \times 30)} \text{ MPa} = 129.3 \text{ MPa} < f_f^w = 160 \text{ MPa}$$

导梁根部下翼缘与钢槽梁连接筋板的焊缝强度计算满足使用要求。

5 结语

本文借助有限元软件建立导梁及钢主梁分析模型, 对顶推全过程结构的最不利受力进行了分析, 通过分析确定了顶推全过程钢导梁及主梁的最不利施工阶段, 有效指导现场顶推施工, 同时也验证了临时支墩布置的合理性及顶推方案的可行性, 可供类似工程借鉴。

参考文献

- [1] 谭钧. 步履顶推施工过程中钢槽梁局部受力分析[J]. 重庆科技学院学报(自然科学版), 2014, 16(5): 4.
- [2] 汪学进, 薛志武. 基于 ANSYS 的钢槽梁顶推施工过程分析与研究[J].

- 中国港湾建设, 2020, 40 (3) : 5.
- [3] 蒋曦骏. 桥梁工程大跨曲线钢槽梁顶推施工关键工艺 [J]. 交通科技与管理, 2021 (17) : 2.
- [4] 宋涛, 韩宝林, 李冉冉, 等. 大跨度变高连续钢箱梁顶推施工安装过程及分析 [J]. 施工技术, 2018 (A4) : 5.
- [5] 黄霞. 钢箱梁顶推施工过程分析 [J]. 西部交通科技, 2020 (5) : 4.
- [6] 高栋, 王亚军. 钢箱梁顶推施工阶段主梁受力的参数分析 [J]. 工程与建设, 2019, 33 (4) : 2.

Stress Analysis of Steel Channel Beam Jacking Construction Process

Miao Zhongyi Wen Dingxu

Cccc Wuhan Harbour Engineering Design And Research Co. LTD, Wuhan

Abstract: The construction process for the bridge main girders includes steel girder construction, deck plate construction, wet joint construction, steel girder construction can be cantilever assembly, bracket assembly or jacking construction, which can be reasonably selected according to the construction environment and schedule requirements. For bridges crossing rivers, the construction methods available are limited by the conditions, cantilever assembly and bracket assembly steel girder installation duration is long, the site is difficult to achieve, so the jacking construction is used, first with the tire frame assembly steel girders, continuous jacking site environmental impact is reduced. The force analysis of the structure during the whole process of jacking is carried out, which can be used as a reference for similar projects.

Key words: Jacking; Bridge; Strength