

大跨度钢梁顶推抗风钢导梁设计

廖虎 赵永思 史小龙

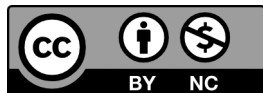
中交武汉港湾工程设计研究院有限公司，武汉

摘要 | 安罗高速黄河特大桥南副桥顶推工程为 100 m 大跨连续钢梁顶推工程，设计一种大跨度钢梁顶推抗风钢导梁，通过有限元结构分析对钢导梁结构进行优化，既能满足顶推施工需求，也能满足非工作状态下抗台风需求，对大跨钢梁顶推具有较大的研究价值。

关键词 | 大跨度；钢梁顶推；钢导梁；抗台风

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/>



随着我国经济与钢结构技术的发展，钢梁因其良好的受力特性被越来越广泛地应用于桥梁工程中，顶推施工是钢梁建设施工的重要方法之一，而钢导梁则是顶推施工的重要临时构件，能减小钢梁悬臂长度、优化钢梁顶推受力^[1, 2]。钢导梁的结构形式与顶推跨度、钢梁结构有很大关系，结构不同，对顶推受力有很大影响，当顶推跨度较大时，钢导梁受力要求就高，尤其是抗风、抗台风要求大大提高。因此，大跨度钢梁顶推抗风导梁研究对大跨钢梁顶推研究有十分重要的意义。

1 工程概况

本项目黄河大桥位于黄河下游花园口至夹河滩河段。南副桥为箱型组合梁，

作者简介：中交二航局武汉港湾工程研究院有限公司，初级工程师。

文章引用：廖虎，赵永思，史小龙. 大跨度钢梁顶推抗风钢导梁设计 [J]. 土木工程进展, 2022, 4 (3) : 21-30.

<https://doi.org/10.35534/ace.0403003>

跨径布置为 $(3 \times 100\text{m}) + (3 \times 100\text{m}) + 7 \times (4 \times 100\text{m}) = 3400\text{m}$ (98#-132#), 如图1所示, 顶推拼装支架设置在南副桥跨中, 顶推借用永久墩, 不设置临时墩。



图1 南副桥顶推跨径图

Figure 1 South auxiliary bridge jacking span diagram

主梁采用“槽型钢主梁 + 混凝土桥面板”的分幅组合结构, 单幅桥采用双梁结构。标准段梁高 4.8m, 钢主梁由上翼缘板、腹板、腹板加劲肋、底板、底板加劲肋、横隔板、横肋组成, 单片钢主梁腹板中心间距 2.0m, 钢主梁上翼板宽 0.6 ~ 1.1m, 梁底宽 2.1m。两片钢主梁通过横梁连接, 中心间距 12.65m, 中间设置小纵梁, 槽型钢梁外侧设置挑梁结构。本桥设置 2% 双向横坡, 横坡通过绕横断面中预制桥面板内侧上边缘点位置旋转形成。钢梁由钢主梁、横梁、挑梁、小纵梁等组成, 标准钢梁截面如图2所示。

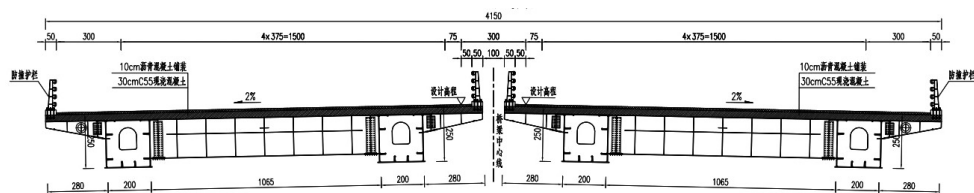


图2 标准钢梁截面图

Figure 2 Standard steel beam section

由于顶推跨度较大, 为 100m, 钢梁梁高 4.8m, 且为四道腹板, 钢导梁自重较重, 对结构影响较大, 且钢导梁截面较高, 承受风荷载较大, 对顶推整体受力影响较大, 尤其是抗台风受力较大, 因此, 对钢导梁结构设计提出了较高要求。

2 抗风钢导梁结构设计

导梁长度一般为最大跨度的 0.5-0.7 倍, 本项目顶推跨度为连续

100m 跨，设计钢导梁长 70m，除头部第一节为 10m，后续均为 6m 一节，共 11 节，节段连接通过法兰连接。导梁设计应满足强度、刚度、稳定性要求，并尽量减小其自重^[3]。由于顶推跨度较大，钢导梁根部弯矩较大，根部采用箱型截面，增大其抗弯性能，除根部外均采用工字型截面，减轻钢导梁自重。

导梁工字型截面变窄、变矮的位置多为受力较差的位置，因此，导梁工字型截面应避免截面突变，通过有限元计算对截面形式进行优化，不仅能减轻钢导梁自重，还能有效优化钢导梁受力。钢导梁联系桁架对导梁顶推受力影响很大，能有效减小钢导梁由于两侧受力不一致导致受扭。导梁节段与节段、联系桁架连接均采用法兰连接，便于现场安装。

由于顶推跨度较大（100m）钢梁高度较高（4.8m），钢导梁顶推过程中风荷载较大，尤其是非工作状态下抗台风要求更高，因此，钢导梁设计加入风撑，有效减小风荷载对顶推的受力影响。

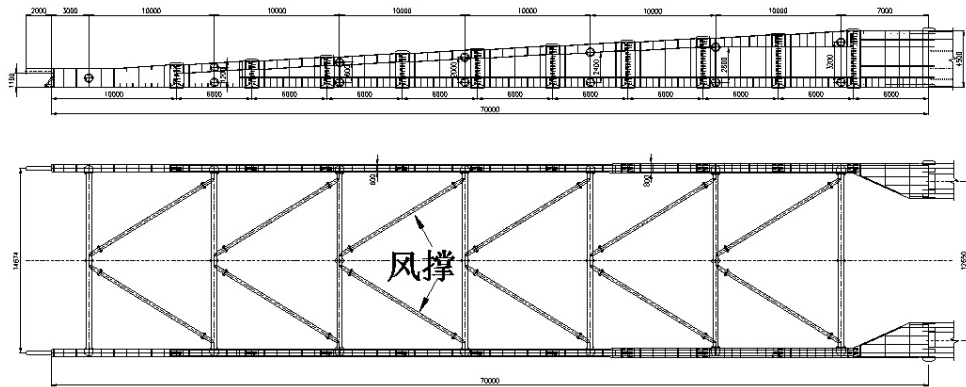


图 3 钢导梁结构图

Figure 3 Steel guide beam structure drawing

3 有限元结构分析

由于钢导梁根部与钢梁连接，且根部受弯矩影响较大，根部设计为箱型截面，根部以外为工字型截面，由箱型截面变为工字型截面处受力较差，在进行 ANSYS 有限元仿真时，钢导梁根部箱型节段采用板单元 shell181 单元模拟，工

字型截面与联系桁架则采用梁单元 beam188 单元模拟，模型各部分装配采用共节点固结，节点耦合及接触分析等方式模拟。在有限元分析的基础上再根据得到的内力等相关信息对结构杆件及相关构件进行详细计算。建立有限元模型如图 4 所示。

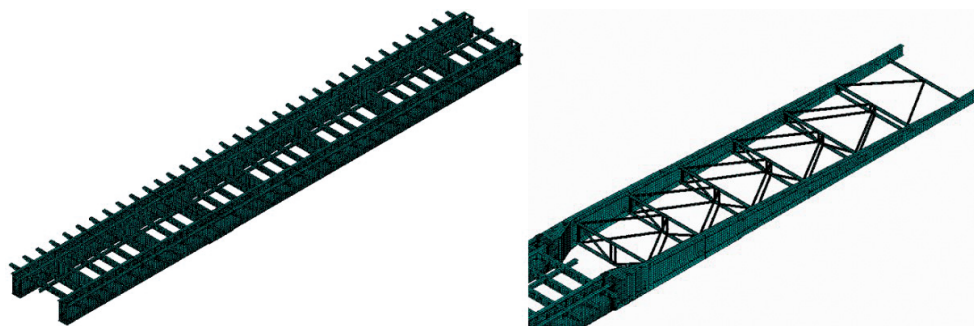


图 4 钢梁与钢导梁有限元模型

Figure 4 The finite element model of Steel beam and Steel guide beam

钢梁根据施工图纸建立真实板单元模型，由于本文主要想分析钢导梁抗风强度，钢梁长度增加时，反而增强了钢导梁的抗风性能，因此只建立最短拼接长度。钢梁自重荷载即为真实荷载，钢导梁自重荷载为 190t，荷载分项系数 1.3。

顶推风荷载根据《起重机设计规范》顶推风荷载分工作状态与非工作状态（抗台风）。工作状态风荷载是在工作时能承受的最大风力；非工作状态风荷载是在不工作时能承受的最大风力作用，有限元分析计算中风荷载均采用荷载分项系数 1.35。计算工作状态风荷载与非工作状态风荷载时，按《GB/T3811-2008》表 15 与表 19 所列的风压高度变化系数来计算受风部位离地高度的影响。

工作状态风荷载按下式计算：

$$P_{wII} = CP_{II}A$$

非工作状态风荷载按下式计算：

$$P_{wIII} = CK_h P_{III}A$$

式中:

P_{wII} ——工作状态风载荷, 单位为牛 (N);

P_{wIII} ——非工作状态风载荷, 单位为牛 (N);

C ——风力系数;

K_h ——风压高度变化系数;

P_{III} ——非工作状态计算风压, 单位为每平方米牛 (N/m²);

A ——构件垂直于风向的实体迎风面积, 单位为平方米 (m²)。

迎风面积的计算需考虑挡风折减作用, 即后片的迎风面积乘以挡风折减系数 η 来计算, η 值按《GB/T 3811-2008》图 5b 定义的结构迎风面的充实率

$\frac{M_x}{\phi_b W_x f} < 1$ 和图 5c 定义的间隔比 a/b 的值选取 (见《GB/T 3811-2008》表 17)^[4]。

此时, 结构垂直桁片的总迎风面积 A 按下式计算:

$$A = (1 + \eta + \eta^2 + \dots + \eta^{n-1}) \varphi A_0 = \frac{1 - \eta^n}{1 - \eta} \varphi A_{01}$$

式中: A ——结构垂直桁片的总迎风面积, 单位为平方米 (m²);

η ——挡风折减系数;

φ ——第一片结构的迎风面积充实率;

A_{01} ——第一片结构的外形轮廓面积单位为平方米 (m²)。

计算后工作状态风荷载如表 1 所示。

表 1 顶推工作状态风荷载

Table 1 Wind load in Incremental Launching Construction working state

	钢梁	钢导梁
间隔比	2.36	4.9
挡风折减系数 η	0.245	0.68
高度 (m)	4.5	3
工作状态风力系数	2.06	1.62
工作状态风荷载 (N/m ²)	150	150
第一片风荷载 (N/m)	1391	729
第二片风荷载 (N/m)	341	496

计算后非工作状态风荷载如表 2 所示。

表2 顶推非工作状态风荷载

Table 2 Wind load in Incremental Launching Construction non-working state

	钢梁	钢导梁
间隔比	2.36	4.9
挡风折减系数 η	0.245	0.68
高度 (m)	4.5	3
工作状态风力系数	2.06	1.62
工作状态风荷载 (N/m^2)	600	600
第一片风荷载 (N/m)	6285	3295
第二片风荷载 (N/m)	1540	2241

本文主要想通过有限元分析对钢导梁抗风强度进行分析,对钢导梁结构进行优化,使其在满足顶推需求的情况下,尽可能减轻其重量。主要计算工况有工作状态下顶推悬臂 5m–100m;非工作状态下悬臂 70m 与 100m。

在 ANSYS 软件中建立顶推结构的有限元分析模型,采用极限状态法对结构进行分析,结果如表 3 所示;由分析可知工况 9 为最危险工况,钢导梁整体最大应力为 $225.7\text{MPa} \leq 295\text{MPa}$,最大竖向位移为 1372.2mm,强度满足要求。

表3 钢梁顶推各工况计算结果表

Table 3 Table of finite element calculation results for each working condition of Incremental Launching Construction

序号	工况 描述	应力 (MPa)			变形 (mm) 导梁	备注
		导梁根部 (Q355)	导梁头部 (Q355)	联系桁架 (Q355)		
1	70m 导梁上墩后继续顶推 5m	81.2	174.7	76.8	-252.2/72.9	
2	70m 导梁上墩后继续顶推 10m	72.5	184.3	72.8	-244.9/129.7	
3	70m 导梁上墩后继续顶推 15m	111.1	205.4	69.9	-242/173.1	
4	70m 导梁上墩后继续顶推 20m	143.6	217.9	66.4	-224.4/197.3	
5	70m 导梁上墩后继续顶推 25m	158.1	199.8	61.4	-188.2/181.4	
6	70m 导梁上墩后继续顶推 30m	189.3	206	57.9	-184.5/187	
7	70m 导梁上墩后继续顶推 35m	188.9	209.3	60.2	-148.8/134.2	
8	70m 导梁上墩后继续顶推 40m	174.1	207.6	58	-114/76.3	
9	70m 导梁上墩后继续顶推 45m	143.4	225.7	66.5	-81/43.9	
10	70m 导梁上墩后继续顶推 50m	109.1	187	57.2	-106/37.6	
11	70m 导梁上墩后继续顶推 55m	73.3	199.1	66.1	-158.1/35.7	
12	70m 导梁上墩后继续顶推 60m	91.9	222.3	69.2	-214.4/36	

续表

序号	工况 描述	应力 (MPa)			变形 (mm) 导梁	备注
		导梁根部 (Q355)	导梁头部 (Q355)	联系桁架 (Q355)		
13	70m 导梁上墩后继续顶推 65m	197.6	213	71.8	-334.7/20.4	
14	70m 导梁上墩后继续顶推 100m	157	190.1	88.4	-1372.2/42.7	
17	70m 导梁上墩后继续顶推 70m (非工作)	189.1	219.6	93.3	-267.1/97.4	
18	70m 导梁上墩后继续顶推 100m (非工作)	161.2	208.8	92.5	-1217.4/15	
	最大值	197.6	225.7	88.4	-1372.2/42.7	

注：本表为支反力设计值（1.35 载荷系数），为单台顶推设备支反力。

由顶推工况计算结果可知，钢导梁悬臂 70m 时结构应力最大，将悬臂 70m 工况下有无风撑进行非工作状态下模拟计算对比，结果如表 4，增加风撑时，钢导梁受扭转明显改善，整体应力减小很多。

表 4 悬臂 70 m 有无风撑计算结果表

Table 4 Calculation result table of cantilever 70m with or without wind bracing

序号	工况 描述	应力 (MPa)			变形 (mm) 导梁	备注
		导梁根部 (Q355)	导梁头部 (Q355)	联系桁架 (Q355)		
1	70m 导梁上墩后继续顶推 70m (有风撑)	189.1	219.6	93.9	-267.1/97.4	
2	70m 导梁上墩后继续顶推 70m (无风撑)	200.7	639.9	379	-227.4/173.0	

有风撑时钢导梁悬臂 70m 下顶推计算工况图如图 5 所示。

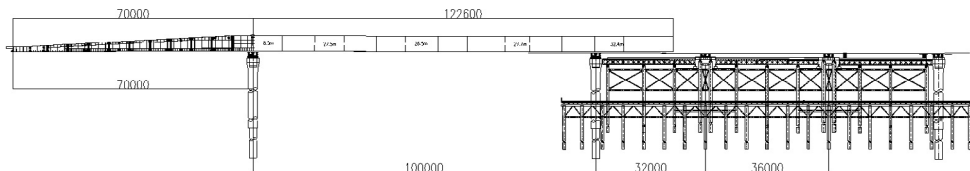


图 5 悬臂 70 m 顶推计算工况图

Figure 5 finite element Calculation working diagram of cantilever 70m
Incremental Launching

有风撑时悬臂 70m 非工作状态下计算结果如图 6 所示, 钢导梁整体最大应力 219.6MPa \leq 295MPa, 最大竖向位移为 267.1mm, 强度满足要求。

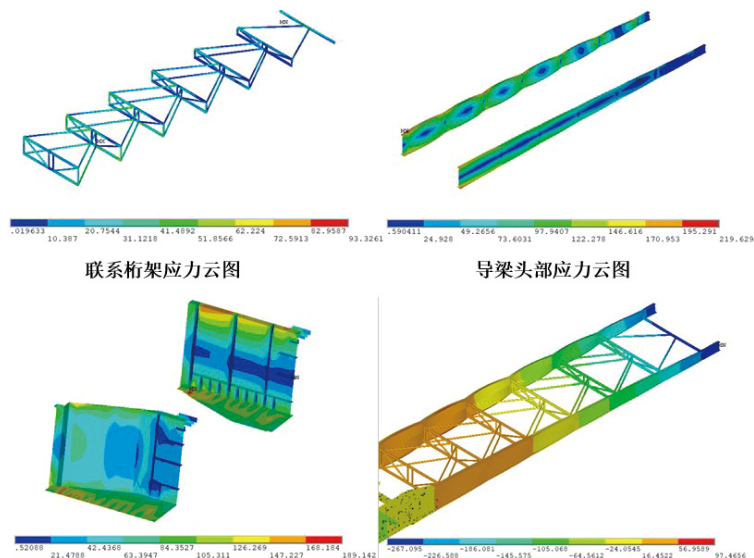


图 6 悬臂 70m (非工作状态) 顶推计算应力与位移云图

Figure 6 Calculation stress and displacement cloud diagram of Incremental Launching cantilever 70m (non-working state)

4 整体稳定性计算

导梁在工况 4 下的受力情况最差的位置截面最弱。此时导梁整体受到的剪力为 491kN, 弯矩为 16400kN·m。考虑 1.2 倍不平衡系数, 顶推设备接触面为顺桥向 1200mm, 横桥向 500mm。

根据《钢结构设计标准》(GB50017-2017), 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:

$$W_x = 7.14 \times 10^7 \text{ mm}^3$$

φ_b 为梁的整体稳定性系数，用下式进行计算。

$$\varphi_b = \beta_b \frac{4320 g}{\lambda_y^2} \frac{Ah}{W_x} \left[\sqrt{1 + \left(\frac{\lambda_y t_1}{4.4h} \right)^2} + \eta_b \right] \varepsilon_k^2$$

有效支撑长度为 10m，计算得 $\lambda_y=105.9$

查表得： $\beta_b=1.4$

计算得到： $\varphi_b=1.76$

因 $\varphi_b > 0.6$ 则：

$$\varphi_b' = 1.07 - \frac{0.282}{\varphi_b} = 0.91 < 1$$

查得此处弯矩为 $M_x = 1.64 \times 10^{10} \text{ N} \cdot \text{mm}$

得： $\frac{M_x}{\varphi_b W_x f} = \frac{1.64 \times 10^{10}}{0.91 \times 7.14 \times 10^7 \times 295} = 0.86 < 1$ ，整体稳定性满足要求。

5 结论

本文设计了一种适用于大跨钢梁顶推抗风钢导梁，以安罗高速黄河大桥南副桥顶推项目为背景，阐述了钢导梁的功能作用、结构形式及顶推受力特点，并对钢导梁与钢梁顶推的整体结构进行了有限元分析，对钢导梁在工作状态与非工作状态下抗风强度进行模拟分析，优化钢导梁结构。

大跨度钢梁顶推风荷载对钢梁顶推受力影响较大，两侧钢导梁所受风荷载区别较大，通过加强风撑，能有效减小风荷载对钢梁顶推影响，优化钢导梁结构，减轻钢导梁自重。同时，钢导梁采用模块化设计，节段与联系桁架连接均采用法兰连接，便于现场安装与循环使用，对大跨度钢梁顶推具有重要意义。

参考文献

- [1] 喻莹，罗尧治. 基于有限质点法的结构屈曲行为分析 [J]. 工程力学, 2009, 26 (10) : 23-29.
- [2] MANFRED K?SMAIER, UWE HEILAND. Der Stahlüberbau des Hochmoselübergangs—konsequent ganzheitliche Lösung [J]. Bautechnik, 2019 (96) : 31-42.

- [3] 杨超. 大跨度顶推钢导梁设计研究 [J]. 铁道建筑技术, 2016 (12): 24-27.
- [4] 北京起重运输机械设计研究院. 起重机设计规范: GB/T3811-2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.

The Design of Steel Guide Beam for Incremental Launching Construction for Large Span Steel Beam

Liao hu Zhao Yongsi Shi Xiaolong

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

Abstract: The incremental launching project of south side bridge of Amro highway Yellow River Bridge is a 100m long-span continuous steel girder jacking project, a new wind-resistant steel guide beam is designed. Optimizing the steel guide beam which can meet the requirements for the incremental launching and Anti-typhoon requirements in non-working state by finite element structural analysis. It has great research value on the incremental launching of large-span steel beams.

Key words: Large-span; The incremental launching of steel beams; The steel guide beam; Anti-typhoon