

DOI: 10.7672/sgjs2022240017

# 施工顺序对钢-混凝土组合梁桥挠度影响研究\*

马海军<sup>1</sup>,王龙轩<sup>2</sup>,任宁波<sup>3</sup>,崔丽娜<sup>3</sup>,智超<sup>3</sup>,刘红波<sup>2</sup>

(1.中交第二公路工程局有限公司,陕西 西安 710065; 2.天津大学建筑工程学院,天津 300072; 3.河北建工集团有限责任公司,河北,石家庄 050051)

[摘要] 以某钢-混凝土组合梁桥为研究对象,对2种不同桥梁施工工序的全过程进行有限元模拟,探讨了施工过程中挠度控制限值。研究表明,改变施工工序对钢-混凝土组合梁桥挠度值影响较大,同时会伴随结构内力值的剧增;为保证成桥安全,避免引起过大的结构变形使桥梁挠度值超出限度,不建议在施工过程中随意变更施工顺序。

[关键词] 桥梁工程;钢-混凝土组合梁桥;挠度限值;有限元分析;施工工序

[中图分类号] U448.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2022)24-0017-04

## The Influence of Construction Sequence on Deflection of Steel-concrete Composite Girder Bridge

MA Haijun<sup>1</sup>, WANG Longxuan<sup>2</sup>, REN Ningbo<sup>3</sup>, CUI Li'na<sup>3</sup>, ZHI Chao<sup>3</sup>, LIU Hongbo<sup>2</sup>

(1. CCCC Second Highway Engineering Bureau Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710065, China;

2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. Hebei Construction Engineering Group Co., Ltd., Shijiazhuang, Hebei 050051, China)

**Abstract:** Taking an actual steel-concrete composite girder bridge project as the research object, through the finite element simulation of the whole process of two different bridge construction procedures, the deflection control limit during the construction process is studied and discussed. The research results show that the change of construction process has a greater impact on the deflection value of the steel-concrete composite girder bridge, and it will be accompanied by a sharp increase in the value of the internal force of the structure. In order to ensure the safe operation of the completed bridge and avoid excessive structural deformation that will cause the deflection value of the bridge to exceed the limit, it is not recommended to change the construction sequence in the construction process.

**Keywords:** bridges; steel-concrete composite bridges; deflection limit; finite element analysis; construction procedure

### 0 引言

钢-混凝土组合梁桥结合了混凝土箱梁桥和钢箱梁桥二者各自的优点,充分利用了混凝土抗压和钢材抗拉的性能优势,有效避免了混凝土开裂和钢材受压失稳问题。相较于纯混凝土箱梁,钢-混凝土组合梁桥自重明显降低,地震作用效应减小,桥梁跨度大大增加<sup>[1-2]</sup>;相较于纯钢箱梁,钢-混凝土组合梁桥用钢量更少、造价更低、结构刚度更大,并具有更好的稳定性、整体性、抗火性与耐久性;另外,采

用混凝土桥面板,也避免了钢桥面铺装病害等<sup>[3-5]</sup>。钢-混凝土组合梁桥符合大跨径桥梁的发展方向,具有显著的技术经济效益与社会效益<sup>[6-8]</sup>。

为进一步提高钢-混凝土组合梁桥的刚度和承载力,将预应力技术引入桥梁结构之中<sup>[9-10]</sup>,为保证引入预应力技术的钢-混凝土组合梁桥中预应力拉索、预制钢箱梁及混凝土现浇桥面板的协同工作与桥梁整体安全性,需在施工过程中对挠度限值进行严格控制。在实际工程实践中,因客观原因所导致的施工工艺流程的改变对桥梁挠度影响较大。本文基于实际桥梁工程,针对钢-混凝土组合梁桥施工流程的改变进行桥梁挠度控制限值讨论,为工程施

\* 河北省全职引进高端人才科研项目(2020HBQZY013)

[作者简介] 马海军,高级工程师,E-mail: 937209019@qq.com

[收稿日期] 2021-10-21

工提供参考。

## 1 工程概况

某桥梁工程位于荣乌高速公路新线京台高速公路至京港澳高速公路段,桥梁全长 1 333m,桥梁左、右幅各分为 13 联。上部结构左、右幅第 4~6 联采用单孔 72m 简支钢-混凝土组合梁,桥墩编号:左幅 10~13 号,右幅 12~15 号;下部结构桥台采用肋板台,桥墩采用柱式墩,墩台采用桩基础。

桥梁整体结构横截面如图 1 所示。72m 简支结构中心线处钢梁高 2.6m,桥面板厚 0.4m,主梁结构中心线处全高 3m,桥面板宽 20.53m。其中,钢-混凝土组合梁桥主梁截面由预制开口钢箱梁和现浇预应力混凝土桥面板通过抗剪连接器组成。钢箱梁单幅横截面如图 2 所示,钢箱梁底板宽 2.8m,横截面为单箱单室,悬臂长度 1.2m。预制钢箱梁设置跨中 160mm 的预拱度,向两端呈二次曲线布置。桥梁横坡通过钢箱梁腹板不等高形成,桥面铺装等厚。钢箱梁单联平面布置如图 3 所示,单幅每联由 4 道主梁组成,每根主梁分 3 个制作段, A、C 段长 23m, B 段长 26m。左、右幅共计 6 联, A、C 段共 48 段, B 段共 24 段。

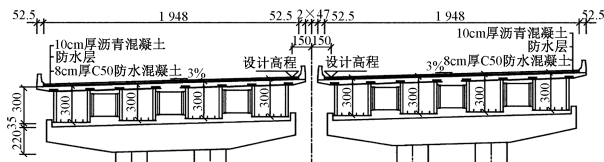


图 1 桥梁整体结构横截面

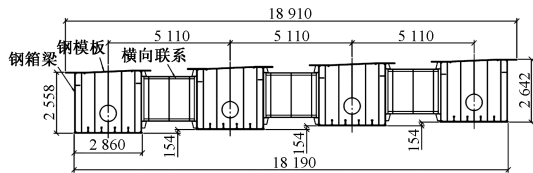


图 2 钢箱梁单幅横截面示意

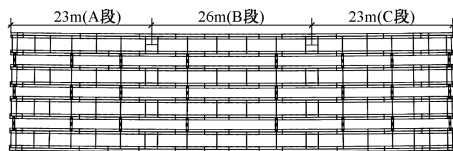


图 3 钢箱梁单联平面示意

## 2 施工工艺及流程

根据该桥结构特点,充分考虑制作、运输等因素,总体施工工艺及流程为:①进行现场勘察测量;②对应位置制作临时支架扩大基础;③预制、安装临时支架(见图 4),校对调节管支撑面标高,并在支座和临时支架上标记坐标点,方便钢箱梁就位;④

钢箱梁按吊装顺序依次运输至现场,随到随吊,尽量不在现场积压,吊装以联为单位,原则上从一端到另一端依次吊装,现场根据实际情况调整;⑤通过连接板和高强螺栓将各钢梁纵向连接成整体;⑥安装、焊接箱间横梁,将钢箱梁横向连接为整体;⑦铺设、焊接桥面钢模板;⑧浇筑箱内混凝土;⑨浇筑桥面混凝土;⑩待混凝土达到强度,张拉预应力钢束;⑪具备拆除临时支架的条件后拆除临时支架和扩大基础;⑫补漆涂装,验收。

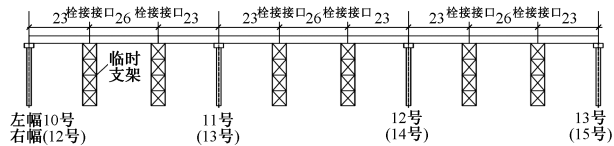


图 4 临时支架布置示意

因施工现场工期及调度安排发生改变,拟计划将临时支架的拆除工序提前至浇筑混凝土前。工序的改变势必会对桥梁挠度值产生影响,故对改变前后的 2 种施工流程进行全过程模拟分析,施工工序分别为:①架设桥墩及临时支撑、钢梁;②现浇桥面板;③张拉预应力钢束;④拆除各临时支撑;⑤桥面系施工。改变后的施工工序为:①架设桥墩及临时支撑、钢梁;②拆除各临时支撑;③现浇桥面板;④张拉预应力钢束;⑤桥面系施工。讨论过程中挠度值控制是否超出安全设计限值。

## 3 施工全过程有限元模拟

采用有限元软件 Midas Civil 中的梁格法建立的钢箱梁模型如图 5 所示。钢箱采用 Q345qD 钢板材料,预应力钢绞线公称直径 15.2mm,钢绞线面积  $139\text{mm}^2$ 。钢绞线抗拉标准强度  $f_{pk} = 1\ 860\text{MPa}$ ,弹性模量  $E_p = 1.95 \times 10^5\text{MPa}$ 。箱内、桥面铺装混凝土均采用 C50 混凝土。

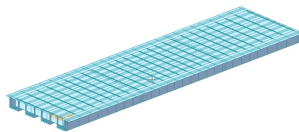


图 5 钢箱梁模型轴测图

采用板单元建立 40cm 厚混凝土桥面板。设置 10cm 厚沥青混凝土桥面铺装与 8cm 厚 C50 防水混凝土调平等桥面施工为恒荷载,根据设计图纸边界条件采用简支梁支座。取 C50 混凝土重度  $\gamma = 26.0\text{kN/m}^3$ ,根据桥面宽度 20.53m、长度 72m,计算出恒荷载中线荷载值  $3.6\text{kN/m}$ 。车道荷载采用 JTG D64—2015《公路钢结构桥梁设计规范》中规定的线荷载  $10.5\text{kN/m}$ 。

### 3.1 预拱度计算

根据 JTG 3362—2018《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》中“当预加应力的长期反拱值小于按荷载频遇组合计算的长期挠度时应设预拱度,其值应按该项荷载的挠度值与预加应力长期反拱值之差采用”,在有限元软件 MIDAS Civil 中设置荷载组合为 1.0 恒荷载+0.5 车道荷载+1.0 预应力,分别计算设计施工工序与改变后的施工工序桥梁预拱度,如图 6 所示。设计施工工序预拱度设置应为 71.3mm 为宜,改变后的施工工序预拱度设置应为 129.0mm 为宜。已知钢箱梁的预拱度设置为 160mm,2 种工序均满足要求。

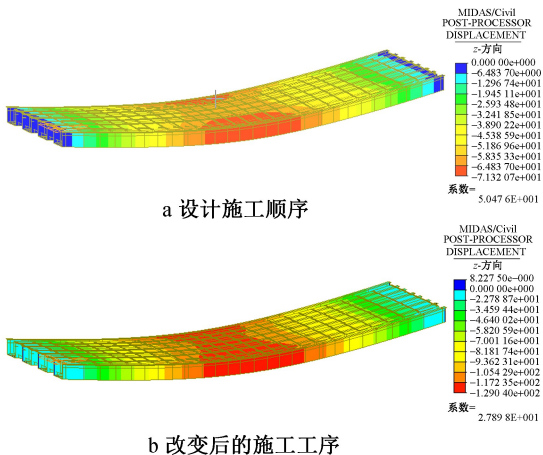


图 6 预拱度计算

### 3.2 设计施工工序结构挠度计算

设置桥梁预拱度为 160mm,分别在各项工序进行时叠加相应的荷载,计算设计施工工序各施工阶段结构挠度,结果如图 7~12 所示。架设桥墩及临时支撑、钢梁后桥梁的最大挠度为 0.359mm,现浇桥面板后桥梁的最大位移为 0.937mm,张拉预应力钢束后桥梁的最大位移为 1.050mm,拆除临时支撑后桥梁的最大位移为 55.633mm,桥面系施工后桥梁的最大位移为 68.743mm,通车运行后桥梁的最大位移为 83.087mm。

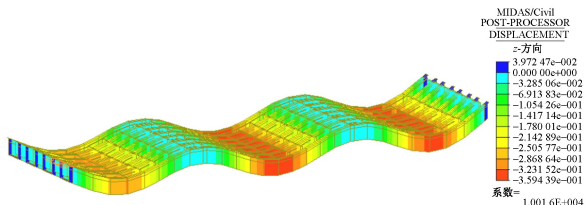


图 7 架设桥墩及临时支撑、钢梁后桥梁位移

### 3.3 改变后施工工序结构挠度计算

设置桥梁预拱度为 160mm,分别在各项工序进行时叠加相应荷载,计算改变后施工工序各施工阶段结构应力及位移,结果如图 13~18 所示。架设钢梁后桥

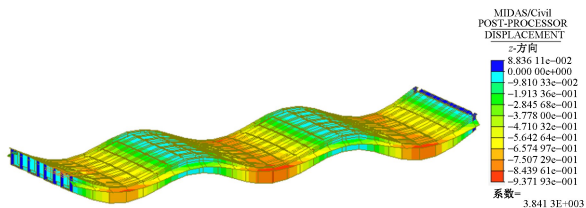


图 8 现浇桥面板后桥梁位移

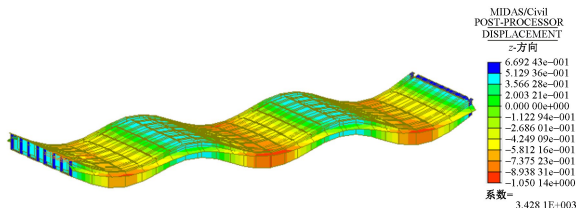


图 9 张拉预应力钢束后桥梁位移

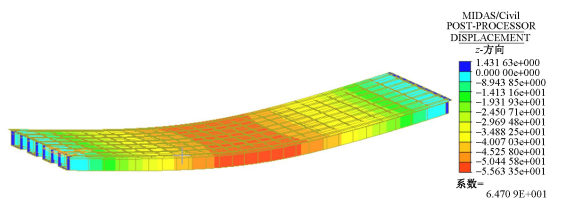


图 10 拆除各临时支撑后桥梁位移

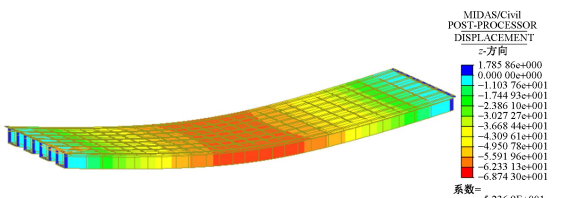


图 11 桥面系施工后桥梁位移

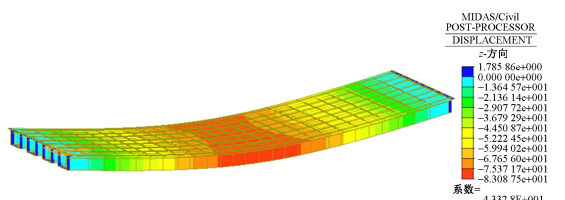


图 12 通车运行后桥梁位移

梁的最大位移为 0.359mm,现浇桥面板后桥梁的最大位移为 116.307mm,张拉预应力钢束后桥梁的最大位移为 252.969mm,拆除临时支撑后桥梁的最大位移为 115.326mm,桥面系施工后桥梁的最大位移为 128.418mm,通车运行后桥梁的最大位移为 141.480mm。

### 3.4 设计施工工序与改变施工工序位移应力对比

钢-混凝土组合梁桥 2 种工序全过程模拟的位移及相应的结构应力值如表 1 所示。

如表 1 所示,改变前后的施工工序对桥梁挠度值影响较大。原设计施工工序挠度随着流程缓慢增加,最大值出现在桥梁通车运行后,仅为



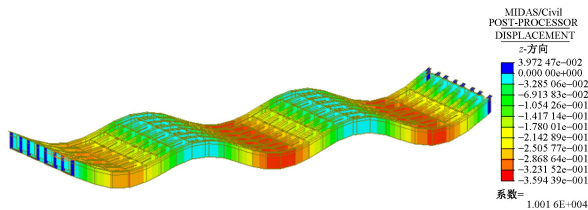


图 13 架设桥墩及临时支撑、钢梁后桥梁位移

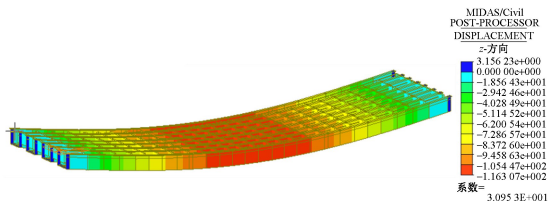


图 14 拆除各临时支撑后桥梁位移

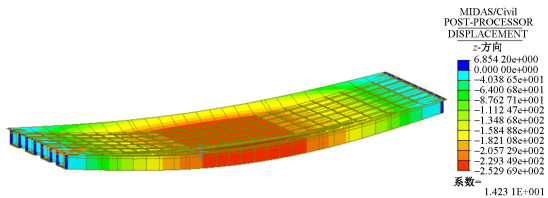


图 15 现浇桥面板后桥梁位移

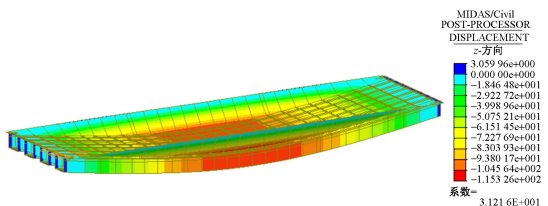


图 16 张拉预应力钢束后桥梁位移

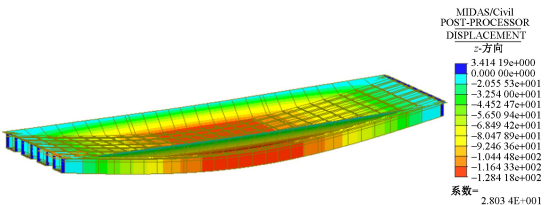


图 17 桥面系施工后桥梁位移

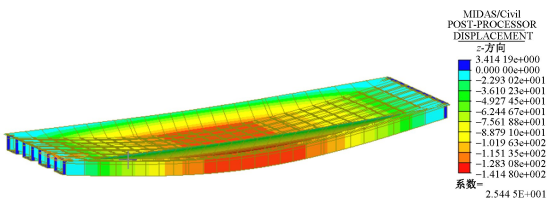


图 18 通车运行后桥梁位移

表 1 施工工序变化前后结构位移应力值对比

设计施工工序	位移/mm	应力/MPa	改变后施工工序	位移/mm	应力/MPa
1 架设桥墩及临时支撑、钢梁	0.359	5.35	1 架设桥墩及临时支撑、钢梁	0.359	5.35
2 现浇桥面板	0.937	14.65	2 拆除各临时支撑	116.307	65.92
3 张拉预应力钢束	1.050	58.83	3 现浇桥面板	252.969	52.00
4 拆除各临时支撑	55.633	47.96	4 张拉预应力钢束	115.326	97.50
5 桥面系施工	68.743	51.57	5 桥面系施工	128.418	101.10
6 通车运行	83.087	106.65	6 通车运行	141.480	42.20

过大,最大值出现在现浇桥面板施工工序后,为 252.969mm,较原设计施工工序增大了 269%。虽然 2 种施工顺序的结构应力值均未超出钢材屈服强度极限值,但是随着挠度的变化巨大,相较于原设计施工工序,改变后的施工工序结构内最大应力值提升较多,从原设计的最大 106.65MPa 增大至 152.0MPa,增大了 42.52%。

### 4 结语

钢-混凝土组合梁桥施工工序的改变对桥梁挠度值影响较大,同时会伴随结构内力值的剧增。为保证成桥的安全工作,避免引起过大的结构变形使桥梁挠度值超出限度,故而不建议在施工过程中随意变更施工顺序。

### 参考文献:

- [ 1 ] 聂建国,余志武.钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J].土木工程学报,1999(2):3-8.
- [ 2 ] 肖林,卫星,温宗意,等.钢-混组合结构桥梁 2019 年度研究进展[J].土木与环境工程学报(中英文),2020,42(5):168-182.
- [ 3 ] 李建勇,马世权.钢-混凝土组合梁现浇桥面板施工技术[J].施工技术,2020,49(S1):1173-1178.
- [ 4 ] 赵君黎,刘晓娣.钢-混组合结构在桥梁中的应用综述[J].特种结构,2017,34(2):99-102,116.
- [ 5 ] 陈亮,钱炜.钢-混组合结构在桥梁中的若干应用[J].工程建设与档案,2005(5):414-416.
- [ 6 ] 高光彬,华正阳.钢-混组合结构桥梁的技术特点与应用[J].公路,2017,62(1):112-115.
- [ 7 ] 罗剑锋,张立杰,王崇虎,等.基于工程实例对高支墩大跨度钢梁吊装的技术综述[J].施工技术,2019,48(S1):542-544.
- [ 8 ] ZHANG Q , JIA D , BAO Y , et al. Flexural behaviors of steel-concrete composite beam considering interlayer slip[J]. Journal of structural engineering, 2019, 145 ( 9 ) : 04019084. 1-04019084. 14.
- [ 9 ] 胡明,宋韬彬,吴文华.主跨 220m 预应力混凝土刚构—连续组合梁桥设计研究[J].桥梁建设,2003(2):38-40.
- [ 10 ] 汪维安,李乔,赵灿辉,等.大跨度体外预应力钢-混组合结构桥梁的动力特性[J].公路交通科技,2013,30(3):59-65,71.

83.087mm;改变后的施工工序将临时支撑的拆除提前至桥梁楼面板施工前,使得桥梁挠度值骤然升高。在预应力张拉工序后,预应力钢束的反拱效应使挠度值有所下降,然而相较于设计施工工序仍然