

钢-混组合梁不同施工方案结构分析研究

梁曾奇

[上海市城市建设设计研究总院(集团)有限公司,上海市 200125]

摘要: 随着人们对桥梁美观及施工期间低影响的要求逐步提升,钢-混组合梁在城市桥梁建设中被广泛应用。钢-混组合梁由于两阶段受力特点,不同的施工方案对其成桥后的结构受力影响较大。以沪杭公路跨线桥为工程实例,通过有限元软件 MIDAS Civil 对 58 m 钢-混组合梁进行不同施工方案仿真分析,对比分析了不同临时支撑布置、施工顺序及落梁拼接方案对结构受力及挠度的影响。结果表明:桥跨范围内设置临时支撑可显著改善钢梁应力及成桥挠度,基本组合下钢梁顶缘拉应力能降低约 35%,成桥后的挠度减少约 33%;先施工完桥面附属再拆除临时支撑对结构应力及挠度改善有限;先拼接后临时撑上落梁方案在结构受力及挠度上均略微优于先落梁后拼接方案。

关键词: 钢-混组合梁;临时支撑位置;施工顺序;先拼接后落梁;先落梁后拼接

中图分类号: U445;TU997

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2026)07-0364-06

Structural Analysis and Research on Different Construction Schemes of Steel-Concrete Composite Beams

LIANG Zengqi

[Shanghai Urban Construction Design and Research Institute, Shanghai 200125, China]

Abstract: With the gradual increase in requirements for bridge aesthetics and low environmental impact during construction, the steel-concrete composite beams have been widely applied in urban bridge construction. Due to the two-stage stress characteristics of steel-concrete composite beams, the different construction schemes have a significant impact on the structural stress of the completed bridge. Taking the Shanghai-Hangzhou Highway Overpass Bridge as an engineering case, the 58-m steel-concrete composite beam is simulated and analyzed for different construction schemes through the finite element software MIDAS Civil. The effects of different temporary support layouts, construction sequences and beam-splicing schemes during lowering on the structural stress and deflection are compared and analyzed. The results show that arranging the temporary supports within the scope of bridge span can significantly improve the steel beam stress and completed bridge deflection. The tensile stress at the top edge of the steel beam under basic combinations can be reduced by approximately 35%, and the deflection of the completed bridge is reduced by about 33%. Completing the construction of bridge deck appurtenances before removing temporary supports has limited improvement on structural stress and deflection. The scheme of splicing first then lowering on temporary supports is slightly superior to the scheme of lowering first then splicing in terms of structural stress and deflection.

Keywords: steel-concrete composite beams; temporary support positions; construction sequences; splicing before beam-falling; beam-falling before splicing

0 引言

钢-混凝土组合梁是在钢结构和钢筋混凝土结构基础上发展起来的一种新型结构。简支组合梁能够充分发挥钢材抗拉、混凝土抗压性能好的优势,具有刚度大、抗震性能好、施工方便等优点,已被广泛应用到大跨径桥梁结构中。由于钢-混组合梁跨径

通常较大,需要工厂分段预制,运至现场拼接成型,因此随着钢混组合梁运用的推广,关于现场施工钢混组合梁的方法也逐步多起来^[1]。本文结合沪杭公路跨线桥工程实例,针对简支钢混组合梁的不同施工方案,通过有限元分析软件分析比较了不同施工方案对组合梁主梁结构应力及挠度的影响,并提出相应的建议,对同类工程的实施具有一定参考作用。

1 工程概况

G228公路上海新建段工程西起金山区与浙江省

收稿日期: 2025-12-29

作者简介: 梁曾奇(1990—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

界,终点至浦东新区南芦公路,穿过上海市的金山、奉贤、浦东新区,全线长约 104 km。本文工程位于奉贤区,在沪杭公路路口采用简支 58 m 钢-混组合梁一跨通过。主梁宽度 24.9 m,由 3 片钢-混凝土的大箱体组成,每个箱体 3 室。结构标准梁高 3.5 m,支点处采用上牛腿断面,上牛腿顺桥向长 1.14 m,牛腿高 1.98 m。混凝土桥面板标准板厚 200 mm,承托处厚度 300 mm。钢-混组合梁立面及横断面见图 1。

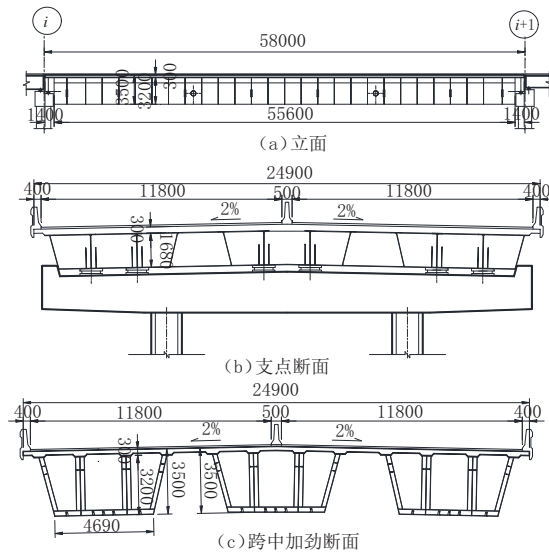


图 1 组合梁立面及横断面图(单位:mm)

钢梁结构采用 Q345qD 材料的槽型钢梁,钢梁中、边腹板的顶纵翼板宽均为 500 mm,厚 25 mm,腹板厚度均为 14 mm,底板宽 4 690 mm,厚 20 mm,横隔板纵向间距 8 m。

2 有限元分析

2.1 计算模型

本工程采用有限元软件 MIDAS Civil 进行计算模拟,目前采用该软件分析组合梁的研究较多,主要计算方法有 3 种:双层梁法^[2]、联合截面法、梁格法^[3]。钱进等^[4]、张海^[5]通过 MIDAS Civil 软件对上述 3 种计算方法进行了对比分析,得出双层梁法和联合截面法的计算结果基本一致,应力略高于梁格法,而双层梁法在温度及收缩作用结果比联合截面法更合理的结论。考虑到本研究主要是不同施工方式对结构影响的横向对比分析,因此采用计算更便捷的双层梁法进行分析。

由于钢-混组合梁为两种材料性质的结构通过抗剪连接件组合起来共同作用,故本模型分别建立 Q345 材料的钢梁及 C50 的混凝土桥面板。由于本计算不考虑扭转分析,在截面模拟方面进行简化,将槽

型钢梁等效为工字梁,混凝土桥面板等效为混凝土 T 梁。在假设钢结构与混凝土结构不出现相对滑移的情况下,采用刚性连接将钢梁与混凝土桥面板单元一对一连接起来,计算模型见图 2。

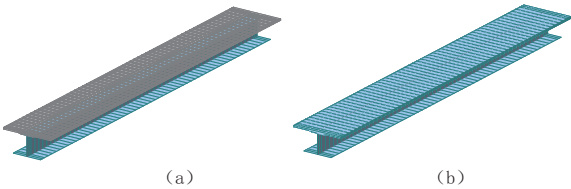


图 2 计算模型示意图

2.2 横向分布系数计算

桥梁断面共 3 个箱体,箱体的最大横向分布系数采用桥梁博士横向分布模块刚接板梁法进行计算^[6],计算过程如下:

由于桥梁左右侧车行道宽度均为 11.8 m,两侧设计车道数最大均为 3 车道,在计入车道折减系数的情况下,对中央分隔带两侧车道的不同布置方式进行试算,最终得到单侧布置 3 列车道时对边箱梁影响最大,最大横向分布系数为 1.781。

考虑单个箱体范围内的偏载系数 1.15,最终单梁采用的横向分布系数为:1.150×1.781=2.05。

3 施工方案对结构影响分析

对于简支钢-混组合梁的受力,通常按照两阶段受力进行计算:第一阶段的荷载包括钢梁自重、浇筑的混凝土和模板的重量等,应由钢梁承担;第二受力阶段的荷载包括二期荷载和后期活载等,应由组合梁承担^[7]。考虑到一期荷载、二期荷载及后期活载作用下参与受力的截面不同,因此截面强度验算时内力叠加方法不适用,应采用应力叠加方法计算^[8-9]。

第一受力阶段和第二受力阶段应力叠加形成成桥后桥梁的应力情况,其中第二受力阶段往往很难优化,因此如何在混凝土板硬化前调整钢梁应力对成桥后结构受力状况至关重要。以下将分别对不同支撑方式、不同的施工顺序、不同的落梁拼接方案这几种情况进行分析比较。

3.1 不同支撑方式对结构的影响

3.1.1 施工方案

桥梁施工方案为先将各节段钢梁运至施工现场,同时在桥跨预定位置设置临时支撑,采用焊接工艺将钢梁拼接成型后吊装钢梁;浇筑混凝土桥面板;拆除临时支撑;施工附属设施。

考虑到简支钢-混组合梁下缘均为拉应力,顶缘为压应力,因此可在桥跨位置处设置临时支撑,给钢梁提供支撑反力,使钢结构在上、下缘应力及挠度均不大的状态下浇筑混凝土。以下将对比不设临时支撑、仅跨中设临时支撑、1/3跨设临时支撑、1/4跨及跨中同时设临时支撑这4种支撑方式对结构的影响,得出对结构最有利的方案。不同的临时支撑的位置方案见图3。

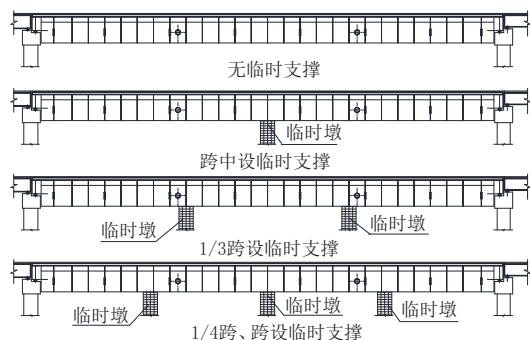


图3 不同临时支撑位置示意图

3.1.2 施工阶段荷载工况(先拼接后落梁)

施工阶段荷载工况如下,计算时按各个施工阶段的工况分别计算应力:

第1阶段:设置永久墩、临时支撑,架设钢梁。此阶段恒载为钢梁自重。

第2阶段:浇筑混凝土板,恒载计入混凝土板重量。

第3阶段:混凝土板凝固,采用刚性连接将钢梁与混凝土桥面板单元一对一连接起来。

第4阶段:拆除临时支撑。

第5阶段:施工桥面附属设施,荷载由钢筋混凝土桥面板和钢梁叠合的组合截面承受。

第6阶段:考虑10年的收缩徐变。

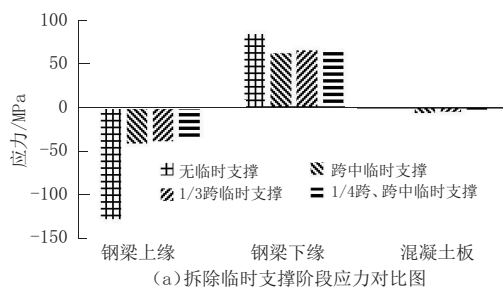
下面采用MIDAS Civil软件根据不同临时支撑位置对组合梁的应力状况进行计算分析。

3.1.3 计算结果分析

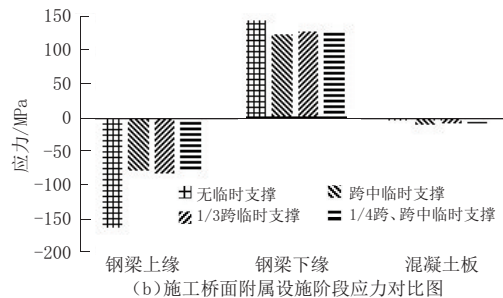
为了方便比较上述提及的4种支撑方式对桥梁的影响,以下将对比这4种支撑方式下桥梁主要施工阶段应力、基本组合应力以及桥梁建成后(第五施工阶段)的挠度。

主要施工阶段不同临时支撑方式的应力对比见图4。

由图4可知,桥跨范围内设置临时支撑对组合梁钢梁部分的应力减小有明显作用,尤其是钢梁,钢梁上缘压应力在成桥阶段减小了50%以上,钢梁下缘拉应力在成桥阶段减小了约13%,混凝土压应力有



(a) 拆除临时支撑阶段应力对比图



(b) 施工桥面附属设施阶段应力对比图

图4 主要施工阶段不同支撑方式下的应力对比图

少许增加。此外,通过对比其他三种支撑方式间的应力可以发现,增加临时支撑的数量对于施工阶段结构应力的改善并没有明显作用。

基本组合下不同支撑方式的应力比较见图5。

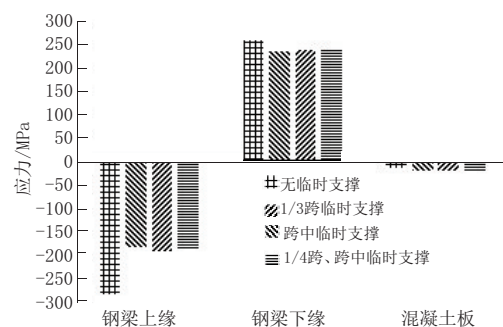


图5 基本组合下不同支撑方式的应力比较柱状图

由图5可知,在基本组合下,桥跨范围内设置临时支撑对组合梁钢梁部分的应力有明显降低,钢梁上缘压应力在基本组合下减小了约35%,钢梁下缘拉应力减小了约8%,混凝土压应力有少许增加。而3种设有不同临时支撑方式的组合梁应力间的差异较小。

桥梁建成后(第5施工阶段)不同临时支撑方式下的跨中挠度对比见图6。

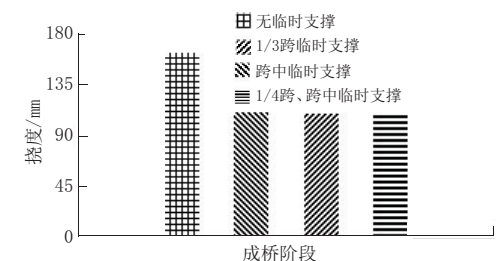


图6 桥梁建成后不同支撑方式的跨中挠度比较柱状图

由图6可知,桥跨范围内设置临时支撑对组合梁建成后的挠度减少了约33%,而3种设有不同临时支

撑方式的组合梁成桥后的跨中挠度差异较小。

综上,在钢-混组合梁施工期间,跨内设临时支撑对改善钢梁应力及跨中挠度有较大帮助,而支撑位置及数量的调整对结构应力及挠度的改善没有明显作用。

3.2 调整施工顺序对结构的影响

3.2.1 施工方案

由于钢-混组合梁桥面板收缩徐变的影响贯穿了桥梁的施工期及运营期,考虑到桥面板浇筑完成初期混凝土的收缩徐变效应更为明显^[10],为进一步减小钢梁应力,考虑将桥面附属设施的施工也在临时支撑上完成,待桥面附属设施完成后拆除临时支撑。验证该调整方案相比原施工顺序(拆除临时支撑后施工桥面附属)对结构受力及挠度是否有一定改善。

3.2.2 施工阶段荷载工况(调整施工顺序)

施工阶段荷载工况如下,计算时按各个施工阶段的工况分别计算应力:

第 1 阶段:设置永久墩、临时支撑,架设钢梁。此阶段恒载为钢梁自重。

第 2 阶段:浇筑混凝土板,恒载计入混凝土板重量。

第 3 阶段:混凝土板凝固,采用刚性连接将钢梁与混凝土桥面板单元一对一连接起来。

第 4 阶段:施工桥面附属设施。

第 5 阶段:拆除临时支撑。

第 6 阶段:考虑 10 年的收缩徐变。

3.2.3 计算结果分析

为验证施工完桥面附属后再拆除临时支撑对结构受力是否有优化作用,以下将对不同施工顺序在不同支撑方式下成桥阶段(第 5 施工阶段)的应力、基本组合应力以及桥梁建成后挠度。

不同施工顺序成桥阶段的结构应力比较见图 7。

由图 7 可知,临时支撑在桥面附属设施完成后拆除,对混凝土桥面板的压应力增加约 13%,对钢梁顶板压应力减少约 15%,对钢梁底板应力影响不大。调整施工顺序后,不同支撑方式的应力变化基本一致。

调整拆除临时支撑的施工顺序后,基本组合下的应力比较见图 8。

由图 8 可知,在调整施工顺序后,基本组合下钢箱梁应力值略微减小,混凝土应力值略微增大,不同支撑方式的基本组合应力变化基本一致。

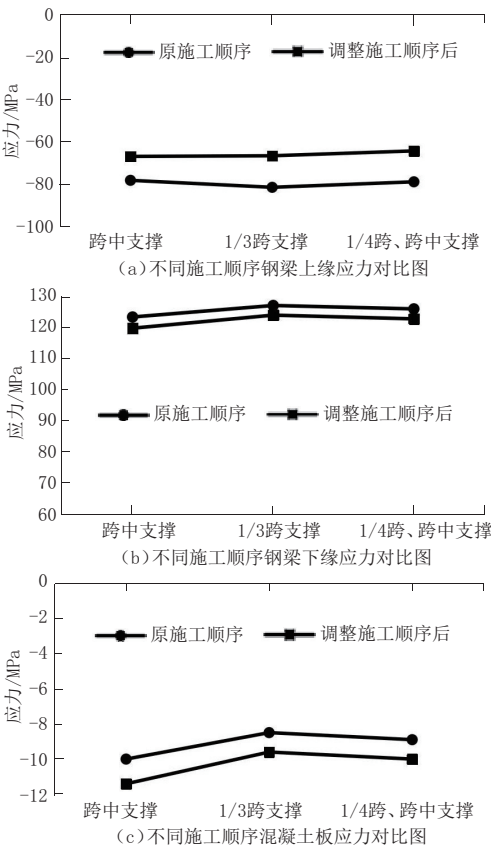


图 7 不同施工顺序结构应力对比图(成桥阶段)

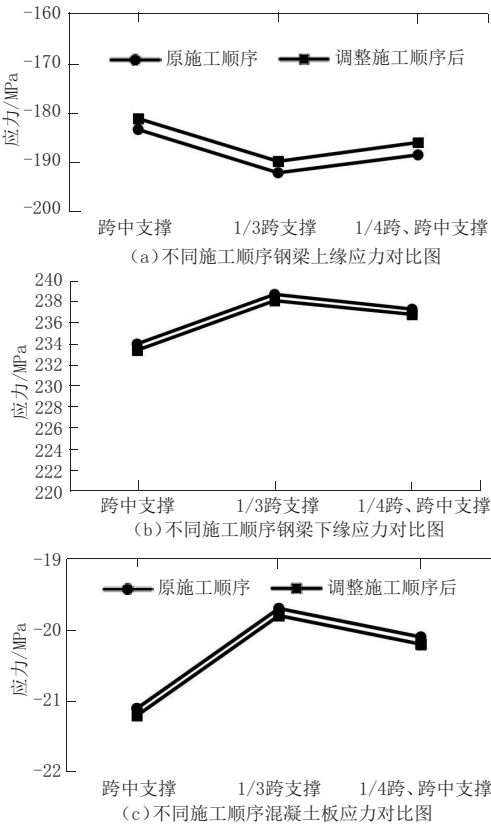


图 8 基本组合下不同施工顺序结构应力对比图

调整拆除临时支撑的施工顺序后,成桥阶段的跨中挠度比较如图 9 所示。

由图 9 可知,调整施工顺序后,成桥阶段的跨中

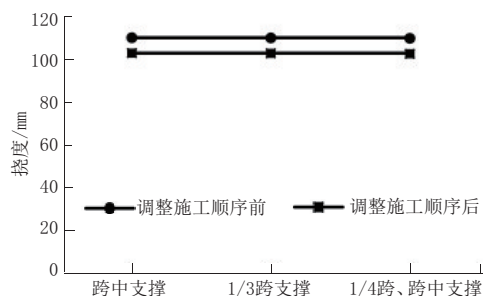


图9 成桥阶段不同施工顺序的跨中挠度对比图

挠度减少约7 mm(减小幅度约6.6%)。不同临时支撑方式的组合梁跨中挠度变化幅度基本一致

综上,采用调整施工顺序方案对桥梁施工阶段的应力、承载能力及成桥后的挠度改善较为有限。

根据调整施工顺序后各施工阶段的应力结果,混凝土桥面板在施工桥面附属设施期间,临时墩位置会产生约2.4 MPa拉应力。如采用该方案,在桥面板可能产生较大裂缝的情况下,可采取相关施工措施如在桥面板浇筑前顶升临时支撑^[11]、分阶段浇筑混凝土桥面板等解决,或可通过增强临时支撑处桥面板钢筋配置、临时支撑处桥面板局部采用钢纤维混凝土等截面增强措施解决^[12-14]。

3.3 不同落梁方案对结构受力的影响

3.3.1 施工方案

由于施工期间场地或者吊装设备等条件限制,钢梁在临时支撑上吊装并焊接成型也在大量工程中采用^[15]。该施工方案为先将各节段箱梁运至施工现场,在桥跨位置设置临时支撑;将钢梁节段吊装至临时支撑上,然后在临时支撑上采用焊接工艺将钢梁节段拼接成型;浇筑混凝土桥面板;拆除临时支撑;施工附属设施。

考虑到简支钢—混组合梁跨中应力最大,如果结构在跨中拼接,对结构受力不利,对焊缝的质量要求也极高,因此不考虑在跨中设置临时支撑的方案。以下将对比在1/3跨设临时支撑条件下,先落梁后拼接方案及先拼接后落梁方案对结构的影响。

3.3.2 施工阶段荷载工况(先落梁后拼接)

施工阶段荷载工况如下,计算时按各个施工阶段的工况分别计算应力。

第1阶段:设置永久墩、临时支撑,架设钢梁。

第2阶段:采用简支变连续方法,在临时支撑上将钢梁焊接成型。

第3阶段:浇筑混凝土板,恒载计入混凝土板重量。

第4阶段:混凝土板凝固,采用刚性连接将钢梁

与混凝土桥面板单元一对一连接起来。

第5阶段:拆除临时支撑。

第6阶段:施工桥面附属设施。

第7阶段:考虑10年的收缩徐变。

3.3.3 计算结果分析

以下将对比组合梁在1/3跨临时支撑条件下,上述2种落梁方案在主要施工阶段应力、基本组合应力以及桥梁建成后的挠度。

主要施工阶段的应力比较见图10。

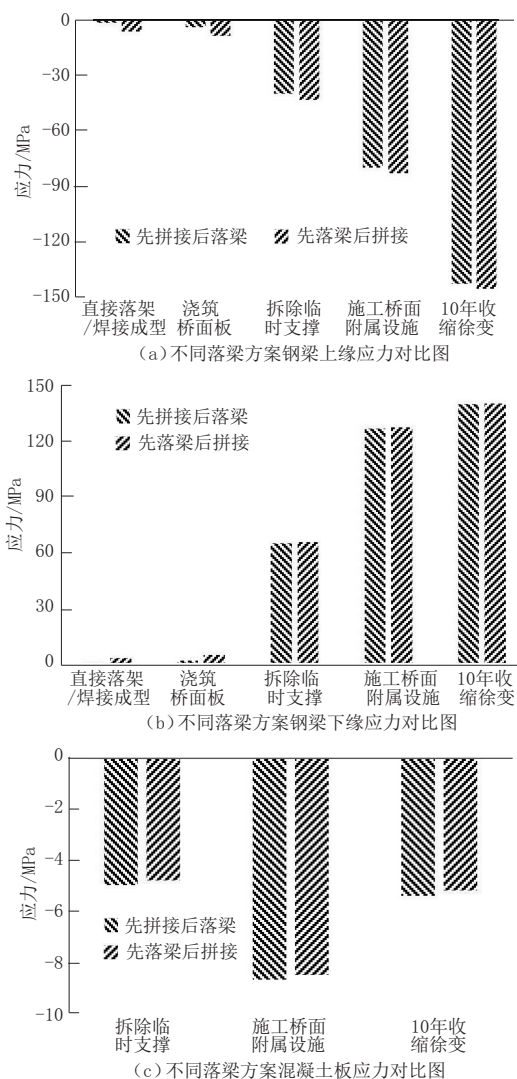


图10 主要施工阶段不同落梁方案结构应力对比图

由图10可知,施工阶段先拼接后落梁方案的钢梁应力全程略低于先落梁后拼接方案,钢梁顶缘压应力最大差值4.5 MPa(落梁阶段),随施工推进逐渐减小至成桥10年后的2.6 MPa;钢梁底缘拉应力差值由3 MPa减小至0.5 MPa;混凝土板应力基本无差异(差值不大于0.2 MPa)。

在1/3跨临时支撑条件下,不同落梁方案在基本组合下的应力比较见图11。

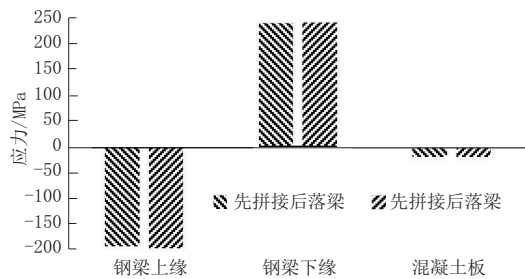


图 11 不同落梁方案的基本组合下应力比较

由图 11 可知,先落梁后拼接方案的基本组合钢梁应力增幅较小(增幅不大于 2%),混凝土板应力基本无差异。

不同落梁方案对应的成桥阶段组合梁跨中挠度比较见图 12。

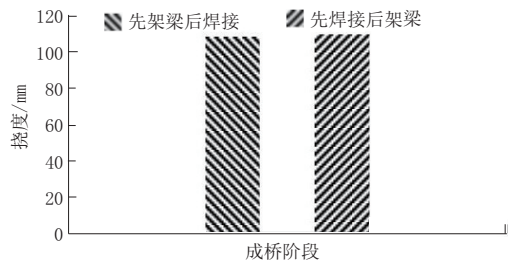


图 12 成桥阶段不同架梁方案的跨中挠度对比图

由图 12 可知,先落梁后拼接方案成桥后的跨中挠度略大(增幅不大于 2%)。

综上,不同的落梁方案对结构受力及成桥后挠度影响均较小。2 种方案的应力差异主要源于架梁阶段的应力差异,先落梁后拼接方案在支架上拼接,各节段按简支梁受力,而先拼接后落梁方案的钢梁在架梁阶段按连续梁受力,因此钢梁应力更低,挠度更小。但由于组合梁钢梁部分自重本身较轻,因此这两种方案的结构应力及挠度无明显差异。

从施工角度出发,地面拼接的焊接工艺、施工精度更易控制,支架上拼接对设备与操作要求更高,因此在吊装设备条件允许的情况下,建议采用先拼接后落梁的施工方案。

4 结 语

本文结合沪杭公路跨线桥的工程实例,研究了不同施工方案对钢—混组合梁的受力方面的影响,得出了以下主要结论。

(1)钢—混组合梁跨内设临时支撑方式对施工阶段及成桥后钢梁应力改善较大,以 58 m 简支钢—混组合梁为例,跨间临时支撑可降低基本组合下钢梁顶缘拉应力约 35%,降低底缘拉应力约 8%,降低桥梁建成后的挠度约 33%。3 种设临时支撑方案的

优化效果相近,从经济性和便捷性出发,推荐采用仅跨中设临时支撑施工。

(2)先完成桥面附属设施再拆除临时支撑方案,对结构受力优化无明显增益,且存在临时支撑位置处桥面板开裂风险,桥梁建成后挠度减少也较小(约 6.6%)。若要采用此种施工方案,在桥面板可能产生裂缝的情况下,可对临时撑位置处的桥面板进行加强,或可采取相关施工措施如在桥面板浇筑前顶升临时支撑、分阶段浇筑混凝土桥面板等解决。

(3)与先落梁后拼接相比,先拼接后落梁方案对钢梁应力及成桥后挠度均有略微降低。从施工角度出发,在临时支撑上拼接钢梁对结构的焊接工艺、施工精度要求较高。因此在条件允许下,推荐采用先拼接后落梁的施工方案。

(4)如何调整混凝土浇筑前钢梁的应力状态是优化钢—混组合梁受力状况的关键,建议今后在施工钢—混组合梁时还可结合采用设置临时预应力、调整混凝土浇筑顺序、临时局部顶升等施工工艺进一步优化结构受力。

参考文献:

[1] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
[2] 邱文亮, 张哲, 黄才良. 钢-混凝土组合梁双层梁有限元分析方法[J]. 大连理工大学学报, 2003, 43(1): 101-103.
[3] 李志锋, 何湘峰, 赵旭东, 等. 装配式钢-UHPC 轻型组合梁设计和整体受力分析[J]. 公路工程, 2021, 46(1): 98-102.
[4] 钱进, 梁振隆. 钢混组合梁结构有限元计算方法研究[J]. 湖南交通科技, 2022, 48(2): 81-84.
[5] 张海. 42 m 简支多主梁活载组合钢板梁有限元分析[J]. 交通与运输, 2019, 35(4): 31-34.
[6] 侯帆. 钢混组合梁桥横向分布及抗弯承载力研究[D]. 南京: 东南大学, 2019.
[7] 黄侨. 桥梁钢-混凝土组合梁结构设计原理[M]. 北京: 人民交通出版社, 2004.
[8] JTG/T D64-01—2015 公路钢混组合梁设计与施工规范[S].
[9] 孙涛. 钢混组合梁桥的设计要点和方法[J]. 城市道桥与防洪, 2017(4): 67-69.
[10] 柴战军, 栗明亮, 齐敦平, 等. 桥面板徐变对大跨径钢混组合梁桥力学性能的影响[J]. 中原工学院学报, 2024, 35(4): 43-52.
[11] 刘曙光. 钢混组合梁负弯矩区受力性能分析及优化方法研究[J]. 湖南交通科技, 2024, 50(1): 87-93.
[12] 赵政耀. 钢-混组合连续梁桥负弯矩区桥面板抗裂措施应用[J]. 城市道桥与防洪, 2025(3): 119-122.
[13] 周慧, 成新. 跨线连续钢-混组合梁桥负弯矩区抗裂措施设计与研究[J]. 南昌工程学院学报, 2024, 43(4): 41-47.
[14] 钟长伟. 大跨简支钢混组合梁桥设计探析[J]. 北方交通, 2024(9): 5-7.
[15] 孙龙龙. 大跨径简支钢-混凝土组合梁桥设计及计算分析[J]. 工程设计, 2021(8): 219-221.