

钢板组合梁桥吊装施工过程风险源分析

荆伟伟¹, 杨智敏², 严水龙², 刘旭政³

(1.嘉善县交通运输局,浙江嘉兴314100; 2.嘉兴市卓越交通建设检测有限公司,浙江嘉兴314001;

3.华东交通大学土木建筑学院,江西南昌330013)

摘要: 吊装施工是钢板组合梁桥施工的主要施工方法之一,其施工过程主要包括钢梁起吊、钢梁拼接架设和桥面板施工等三个阶段。为保证采用吊装施工的钢板组合梁桥在施工过程短暂受力情况下的承载能力、稳定性及结构抗倾覆性满足要求,将围绕不同施工阶段下钢梁的受力特点及其可能承受的荷载作用进行分析,探讨各施工阶段下钢梁施工风险源形式及施工安全分析重点,可为钢板组合梁桥安全施工过程分析及采取预防措施提供指导。

关键词: 钢板组合梁桥; 吊装施工; 施工安全; 受力特点

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)10-0146-05

0 引言

钢板组合梁桥在施工中的各个阶段存在一些不利影响因素,影响施工质量及危害结构安全。李绍华等^[1-3]钢板组合桥梁施工过程进行了研究。在钢梁起吊及架设初期,钢梁边界条件变化大,约束能力差,会影响构件受力、变形及稳定性;在钢梁架设过程中,钢结构受日照温度影响较大,钢梁拼接会受到温差的影响,可能造成施工阶段及成桥阶段桥梁结构存在不利受力状态;在桥面板施工阶段,桥面施工荷载作为外荷载施加于钢梁上,不利荷载的组合易产生钢梁横向受力不均、负弯矩区混凝土开裂等问题。考虑到吊装施工过程风险源多且存在耦合,钢梁易存在多种不利施工状态,本文对钢梁起吊、架设及桥面板混凝土浇筑三个阶段进行分析,明确不同施工阶段中的影响荷载,为钢板组合梁桥安全吊装施工方法制定提供参考。

1 钢板梁吊装施工过程安全控制问题

钢板组合梁施工过程涉及钢梁的加工与运输、钢梁的安装及混凝土桥面板施工几个阶段。在每个施工阶段钢梁的荷载形式、边界条件等都在发生变化,根据《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》5.2.3规定^[4],组合梁的短暂情况设计应对组合梁在施工过程中各个阶段的承载能力及稳定性进行验算,必

要时尚应进行结构的倾覆验算。

1.1 构件或结构承载能力

在钢板梁施工阶段,承载力计算应考虑所有适用的荷载,荷载组合应采用基本组合,并满足下式要求:

$$\gamma_0 S_d \leq R_d \quad (1)$$

式中: γ_0 为结构重要性系数; S_d 为作用组合的效应(如轴力、弯矩或表示几个轴力、弯矩的向量)设计值; R_d 为结构或结构构件的抗力设计值。

具体施工阶段钢梁强度验算可参考《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[5],且钢梁的应力不应大于 $0.95 f_d$ 。

1.2 稳定性分析

钢板组合梁桥在运营期间因混凝土桥面板与钢梁形成整体受力,混凝土桥面板对钢梁起到了较好的约束作用,使结构的稳定性得到较好的改善,特别是上翼缘板的局部稳定性。而在短暂状况下(施工过程中),即在混凝土浇筑完毕但未凝固之前的整个过程,在不利荷载组合作用下,钢梁支撑自由长度较大,容易发生稳定性问题。钢梁的稳定性包括整体稳定性和局部稳定性。

(1) 整体稳定

对于受弯钢梁,在荷载作用下构件可能突然偏离原来弯曲变形平面,而发生侧向挠曲和扭转,表现为整体失稳,见图1。根据《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[5],受弯构件整体稳定性应按式(2)计算:

$$\frac{M_x}{\varphi_b W_x} \leq f_d \quad (2)$$

收稿日期: 2022-10-19

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2021034)

作者简介: 荆伟伟(1987—),男,硕士,高级工程师,从事交通建设行业管理工作。

式中: M_x 为绕强轴作用的最大设计弯矩值; W_x 为按受压最大限位确定的钢梁毛截面模量; φ_b 为钢梁整体稳定系数,具体计算可参见《钢结构设计标准》(GB 50017—2017)^[5]附录 C; f_d 为钢梁材料强度设计值。

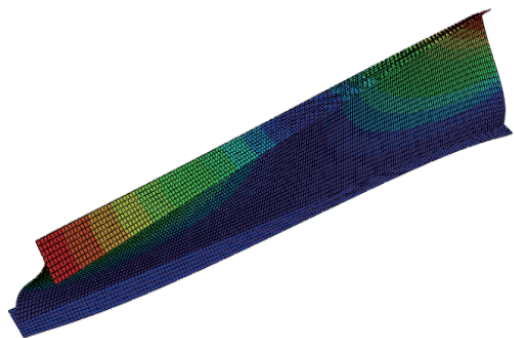


图 1 均布荷载作用下钢梁的整体失稳形态

构件的整体稳定计算主要依赖于构件的整体状况,如端部约束条件、支撑间长度及荷载沿构件分布等。

(2)局部稳定

如果板件的宽度与厚度之比太大,在一定的荷载条件下,会出现波浪状的鼓曲变形,表现为局部失稳。这种失稳虽不直接降低结构的承载能力,但有可能诱发结构的整体失稳,进而间接影响结构的承载能力。钢梁的局部稳定可能发生在上下翼缘板、腹板等受压区,设计时通常采用钢板宽厚比、设置横向加劲肋等措施来加以控制。

1.3 钢梁安装过程抗倾覆性

在钢梁安装过程中,支撑约束不足时,当钢梁受到不利荷载作用(如侧向风荷载),或曲梁起吊过程中产生较大扭转荷载时,可能发生倾覆的危险。对于采用橡胶支座支承的直线钢梁安装过程,其倾覆危险一般发生在单梁状态(简支),见图 2。

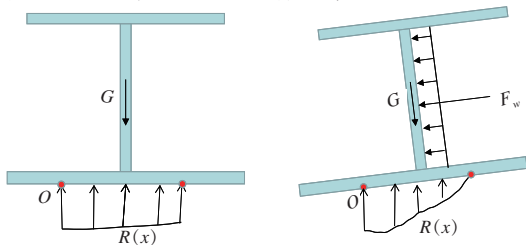


图 2 单梁倾覆计算简图

由图 2 可知,当支承反力力矩不足以抵抗侧向力 F_w 作用产生的力矩时,钢梁会发生倾覆。故为保证钢梁不发生倾覆,应满足:

$$\frac{G \cdot d/2 - \int R_x dx}{F_w d_w} \geq k_{qt} \quad (3)$$

式中: F_w 为侧向作用力,如风荷载、吊装构件碰撞力等; d_w 为侧向力的力矩,即图中作用点到 o 点距离;

R_x 为梁底分布的支承反力; d 为支座宽度; k_{qt} 为横向抗倾覆稳定系数,取 2.5。

2 起吊施工过程分析

在钢梁起吊前,应制定吊装程序,包括吊装梁阶段划分(需考虑起重机设备的起吊能力)、吊点的位置、起吊速度等,以保障钢梁起吊过程中具有足够的强度和抗屈曲能力,对于曲线梁段还需保证其抗倾覆能力。钢梁梁吊点的连线应通过构件的重心,并且每个吊点处的起吊反作用力应相等。在确定重心时,对于采用双梁或多梁形式情况,在起吊前应考虑钢梁间的横梁的影响。

(1)直梁

钢梁起吊时,建议采用两点起吊。当采用单点起吊时,吊点相当于单点支承,钢梁被划分为两段长悬臂;梁段内应力会明显增大;梁端变形增加,不利于控制安装;梁段的稳定性得不到保证。采用两点起吊时,如果采用垂直吊绳,钢梁基本可以简化为两点支承的情况来进行受力特性分析,见图 3。如果采用斜向吊绳时,吊绳会在钢梁内形成水平力,钢梁起吊分析时应考虑该影响,见图 4。此外,每处吊点的吊耳应设置在钢梁轴线上,或对称于梁轴线(还应注意翼缘板的强度是否满足要求),见图 5,以防止起吊过程中钢梁的倾覆。对于直线钢梁的起吊,应根据施工应力和变形要求,及稳定性来确定合理的吊点位置及起吊钢梁节段的选择。

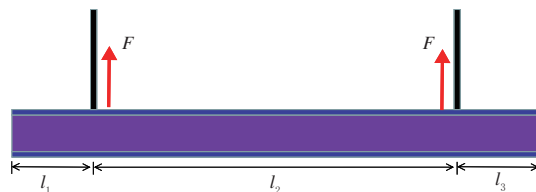


图 3 垂直吊绳起吊

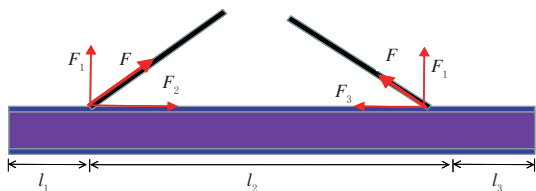


图 4 斜向吊绳吊装



图 5 吊点吊耳设置

(2)曲梁

对于曲线钢梁节段的起吊,相较于直线梁段,因

曲率的影响更容易出现倾覆,故应尽可能使吊点连线通过曲线梁段的重心,见图6,否则会出现图7中的倾覆情况,进而影响到吊装安全及梁段拼接。

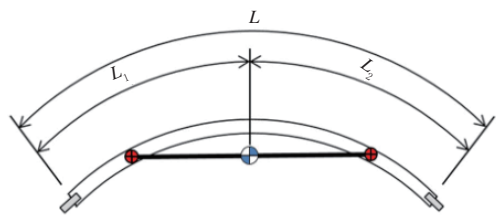


图6 吊点连线通过曲线梁段的重心

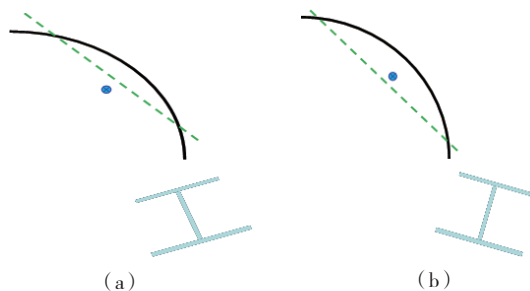


图7 曲梁可能的倾覆情况

对于图8所示总长为 l 的理想均质曲线梁段,半径为 r ,面积为 A ,密度 ρ 沿重心线均匀分布。以圆心为坐标原点建立坐标系,可计算梁段总质量为:

$$M = \int_{\frac{\pi-\beta}{2}}^{\frac{\pi+\beta}{2}} \rho A \cdot r \cdot d\theta = \rho A r \beta \quad (4)$$

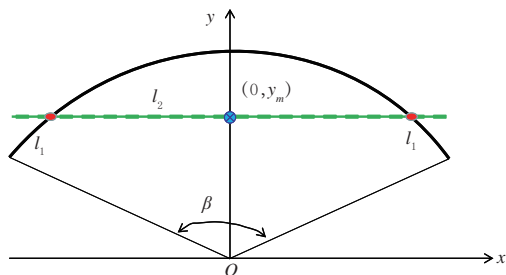


图8 曲梁重心计算示意图

进而可计算其重心位置:

$$\begin{aligned} y_m &= \frac{\int \rho A \cdot r \cdot d\theta}{M} = \frac{\int_{\frac{\pi-\beta}{2}}^{\frac{\pi+\beta}{2}} \rho A \cdot r \cdot \sin\theta \cdot r d\theta}{\rho A r \beta} \\ &= \frac{\rho A \cdot 2r^2 \cdot \sin(\beta/2)}{\rho A r \beta} = \frac{2r \cdot \sin(\beta/2)}{\beta} \end{aligned} \quad (5)$$

考虑到实际吊装梁段不是理想材质,其截面质量不可能集中在截面中心,这导致梁段的中心的位置会与理想位置有所差别,从而会存在不平衡的倾覆力矩,选择合理的吊点位置,确定合理的 l_1 和 l_2 梁段长度,需要进行深入分析。

3 架设施工过程受力分析

架设施工阶段包括从钢梁吊装至设计位置至全部钢梁吊装完成即将进入浇筑桥面板整个过程,该过程中钢梁存在边界条件变化、荷载耦合作用及体

系转换等不利风险源,进行钢板组合梁桥施工安全分析前需明确各类风险源。

(1) 恒载

在施工过程中,恒载主要由钢梁的自重产生,桥面板浇筑过程中,桥梁自重还包括浇筑混凝土自重。这些根据设计图纸实际尺寸可以获得。但在起吊过程中,应考虑动力产生的效应,根据《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[6],引入1.20倍的动力系数进行考虑。

(2) 风荷载

在桥梁结构施工时,风荷载作为活荷载施加于结构上,风荷载标准值按现行《公路桥梁抗风设计规范》(JTG/T 3360-01—2018)^[7]确定,并由《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[6]进行相应荷载组合。风荷载 F_w 大小与风压相关,作用到单位面积上的风荷载可表示为:

$$F_w = w_k A_w \quad (6)$$

(3) 温度荷载

温度荷载具有复杂的时变特性且作用于桥梁结构的整个生命周期,环境温度变化对组合梁桥的影响不可忽视。钢材的导热系数约为混凝土的50倍,钢板梁可以对环境温度的变化迅速作出响应,因此钢-混凝土组合梁桥温度场的研究是解决桥梁温度问题的关键。目前大部分钢-混凝土组合梁桥的研究是针对浇筑好混凝土桥面板和铺装层后的钢-混凝土组合梁桥成桥状态,对在未浇筑桥面板状态下组合连续梁桥温度场及温度效应研究较少。在无桥面板状态下,钢梁均能直接受到日照辐射,各钢主梁的温度梯度明显比成桥阶段要大,尤其是多主梁钢板组合连续梁桥,各主梁温度梯度比双主梁组合梁桥复杂。同时,我国相关规范未对无桥面板状态下的组合梁结构温度梯度做出详细规定。英国BS-5400规范^[8]对不同承重结构类型、不同铺装层厚度下的温度梯度做出了详细规定,见图9。同时,表1中为不同铺装层厚度下温度梯度,在铺装层为0 mm时可表示为未浇筑桥面板时,即仅架设钢梁节段,的温度参数值。而本文对某改扩建公路上钢板组合梁桥钢梁吊装阶段的钢梁温度梯度进行了实际测量,建立了15:00时的温度曲线,见图9。通过对比可以看出,英国BS-5400规范温度曲线与实测温度有所不同,UK梯度温度从上缘至下缘逐级递减,温度梯度远大于实测值,在梁高范围内温度差最大可达到27℃,且未考虑主梁空间位置不同而产生的温度梯度差异以及

存在横梁温度梯度,这对钢梁受力会产生明显影响。

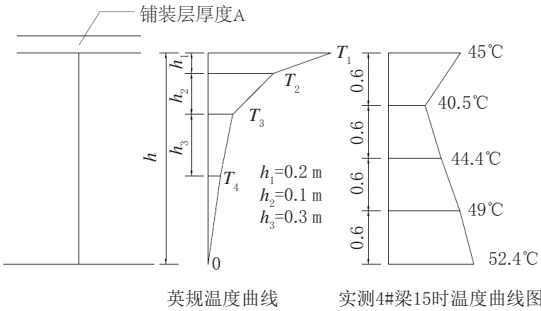


图 9 英国 BS-5400 规范温度梯度曲线与实测温度曲线对比

表 1 英国 BS-5400 规范参数 T 取值 单位: $^{\circ}\text{C}$

铺装层厚度 /mm	T_1	T_2	T_3	T_4
0	30	16	6	3
20	27	16	9	5
10	24	14	8	4

(4)强迫拼装

钢梁在制造误差、温差作用或悬臂状态等因素下,可能会出现拼装误差。《公路钢混组合梁桥设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)^[4]规定,钢梁在拼装过程中应减少相邻梁段接缝偏差,在纵横向及高度方向的拼接错口不宜大于 2 mm。若存在拼装误差超限时,将严重影响施工质量及结构受力状态,见图 10,其影响不应忽略。



图 10 强迫拼装

进行强迫拼装会给构件施加强制位移或附加外力,影响构件或结构受力。以一双主梁拼装施工为例,主梁长 28 m,间距 4m,梁高 2.4 m,在拼装中间小横梁时存在 6 mm 强迫拼装,见图 11。通过计算,因强迫拼装导致钢梁产生局部应力达到 106.37 MPa,发生在腹板处。可见,强迫拼装会明显增加钢梁内部应力,产生永久不利影响。

(5)偶然荷载

在钢梁吊装过程中,偶然荷载会影响构件的强度及稳定性。例如起重机吊钩或提升的构件可能会撞击先前放置的钢梁,或者下方运行的设备可能会意外撞击到先前放置的钢梁。虽然这些载荷是很难去定义量化,但应在施工阶段受力分析考虑到此类

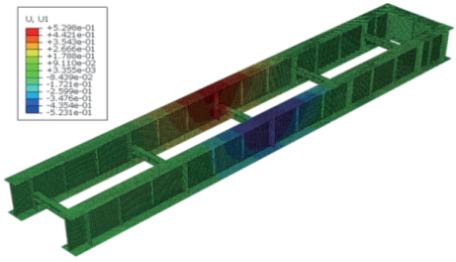


图 11 6 mm 强迫拼装计算

意外事件。

(6)约束支承条件

在钢梁架设过程中,需要考虑稳定性和抗倾覆的影响,在施工操作时需增加临时支座或采取临时固结措施。图 12 为某改扩建公路上钢梁架设时一端支承于桥墩盖梁支座上,一端采用牙板固结于临时支架上,而在后期又出现钢梁悬臂支撑的工况,见图 13。不同支撑条件下对钢梁的受力响应及稳定性影响较大,图 14 和图 15 中为单片钢梁一端采用牙板固结与临时支架上,另一端在桥墩盖梁上采用固结和简支支撑时第一阶失稳模态,前者为跨中侧向弯扭失稳,而后者为在简支段侧扭。分析不同边界条件对钢梁支撑时的应力状态、变形量及稳定性,有助于指导施工过程中作出支撑约束选取或临时支撑设计。



图 12 单梁一端用牙板固结于临时支架上



图 13 悬臂拼装

4 桥面板施工过程受力分析

在桥面板与钢梁形成整体工作前,桥面板混凝土及一些临时荷载都是作为外荷载作用于钢梁上,这一过程中钢梁的受力特性及稳定性都需要格外关

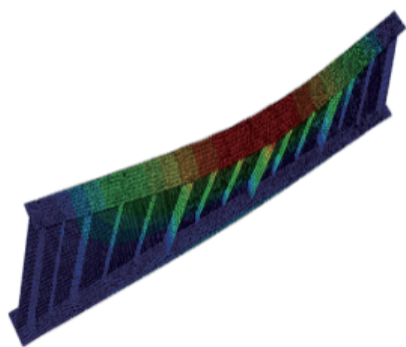


图 14 两端固结时失稳模态



图 15 一端固定一端简支时失稳模态

注。确定合理的混凝土浇筑顺序:(1)确保钢梁不产生较大局部应力;(2)保证浇筑混凝土过程中,不造成邻跨明显上拱及支承处出现拉力,如图 16 所示两跨连续梁;(3)保证有较高稳定系数。

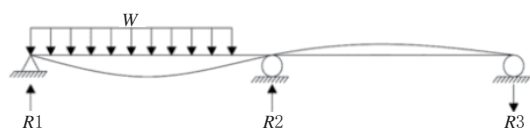


图 16 两跨连续梁浇筑混凝土桥面板后响应

5 结 论

本文对钢板组合梁桥吊装施工过程中的风险源进行了探讨,主要结论如下:

(1)钢板组合梁桥吊装施工过程中由于风险源荷载不确定及混凝土与钢梁未形成整体工作状态而可能存在施工安全隐患,应对该不利状态下的结构强度、稳定性及倾覆性进行验算。

(2)在钢梁起吊阶段主要受重力荷载作用,起吊过程中具有足够的强度和抗屈曲能力,对于曲线梁段还需保证其抗倾覆能力;钢梁架设阶段中钢梁存在边界条件变化、荷载耦合作用及体系转换等不利风险源,荷载主要包括自重、风荷载、温度、偶然荷载及强迫拼装;桥面板施工阶段荷载包括了混凝土自重及施工临时荷载。

(3)在吊装施工不同阶段中风险源多且存在耦合,致使钢梁易存在多种不利施工状态,在吊装施工前应明确不利风险源的影响,以保证施工安全。

参考文献:

- [1] 李绍华.全宽预制桥面板钢板组合梁工业化建造技术研究[J].工程技术研究,2019,4(22):79-80.
- [2] 郭一枝,贺耀北,焉学永,等.连续钢板组合梁力学性能研究[J].世界桥梁,2019,47(4):58-63.
- [3] 龚翔箭.中小跨径钢板组合梁桥成桥过程稳定性研究[D].西安:长安大学,2019.
- [4] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
- [5] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
- [6] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
- [7] JTG/T 3360-01—2018,公路桥梁抗风设计规范[S].
- [8] BS 5400 Steel, concrete and composite bridges (Part 2. Specification for loads)[S].BritishStandard Institute, 2006.

《城市道桥与防洪》杂志

是您合作的伙伴,为您提供平台,携手共同发展!

欢迎新老读者订阅期刊 欢迎新老客户刊登广告

投稿网站: <http://www.csdqyfh.com> 电话:021-55008850 联系邮箱: cdq@smedi.com