

60 m 钢板组合梁桥钢梁施工稳定性分析

杨智敏¹, 荆伟伟², 严水龙¹, 刘旭政³

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

3.华东交通大学土木建筑学院, 江西 南昌 330013)

摘要: 钢板组合连续梁桥因自重轻、截面较薄, 在施工过程中受外荷载影响存在整体失稳和局部屈曲风险, 影响桥梁施工安全。以交通部钢板组合梁桥 60 m 跨径进行参数分析, 研究其施工阶段整体及局部稳定性。同时, 对比分析了不同跨径、高跨比和横梁间距下稳定性变化规律。结果表明: (1) 随着节段跨径增大, 钢梁稳定系数下降, 跨径每增大 5 m, 稳定性降低 40% 左右, 40 m 跨径时处于规范限值临界状态; (2) 相同跨径下, 钢梁稳定性随着梁高增大而减小, 梁高超过 3.5 m 时, 40 m 跨径单梁稳定系数低于规范临界限值, 结构稳定性较差; (3) 横梁间距超过 10 m 时, 缩短横梁间距可以提高结构稳定性, 间距小于 10 m 时改变横梁间距对结构稳定性提升不大。

关键词: 钢板组合梁桥; 吊装施工; 施工安全; 稳定性

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2023)09-0234-04

0 引言

近年来, 随着钢铁产能的提高和钢结构桥梁建设技术的发展, 我国已经具备了推广钢结构桥梁的物质基础和技术条件。2016 年 7 月, 交通运输部发布了《关于推进公路钢结构桥梁建设的指导意见》, 此后国内各地公路桥梁迎来钢结构桥梁建设浪潮。2011 年, 安徽省开始对钢板组合梁桥开展了系统研究, 已完成了多套上部结构通用图设计, 并于 2013 年在安徽济祁高速淮河桥长引桥中首先采用了这一结构形式。2018 年 12 月, 浙江省交通规划设计研究院有限公司编制完成了《钢板组合梁桥通用图》, 适用于跨径为 35 m 和 45 m 的双向四车道和双向六车道公路的上部结构。2020 年, 安徽省制定颁布了地方标准《双主梁钢板组合梁桥设计与施工指南》。2020 年, 浙江省制定颁布了地方标准《公路钢板混凝土组合梁桥设计规范》。2022 年 4 月颁布实行的《装配化工字组合梁钢桥通用图》中推荐 40~60 m 跨径钢桥宜优先选用工字组合梁结构。随着钢板组合梁标准图及规范的编制^[1-3], 可以预见, 国内各地钢板组合梁桥结构体系将得到大范围的推广和应用。

然而, 由于目前建成的钢板组合梁桥数量有限, 国内对于钢板组合梁桥的研究多集中在受力分析、

结构体系、构造设计方面^[4-5], 建设各方对这一新型桥梁结构在施工过程中存在的问题及风险认识不足, 大跨度钢梁在施工阶段下的长悬臂状态及吊装过程中受外部荷载或者环境影响存在发生整体失稳和局部屈曲的风险^[6-7]。本文以 60 m 钢板组合梁桥为研究对象, 分析了在钢桥吊装阶段承受的各种不利荷载, 计算了不同设计参数下的钢梁稳定性, 研究结果可为大跨径钢板梁桥的设计及施工提供有益参考。

1 设计参数的选取与模型的建立

钢板组合梁桥施工过程中几何参数、施工边界、施工顺序及方法等均为不确定性因素^[8]。为使本研究结果具有广泛指导意义, 首先对几套通用图纸几何信息及施工方法进行调研, 并据此确立研究参数。其次, 基于有限元分析软件, 采用稳定性分析手段分析各工况下受力响应变化规律, 并给出有效施工建议。

1.1 设计参数的选取

钢梁的几何参数对结构受力特性影响较大, 建立合理的几何参数工况, 可有效提高分析效率, 并使分析结果具有广泛性。为此, 本文汇总了交通部标准图纸中 30~60 m 跨径钢板连续梁桥的钢梁参数信息, 详见表 1。

从表 1 可以看出, 60 m 跨径钢板梁梁高为 3 m, 高跨比为 0.05, 在 30~60 m 跨径中更易出现整体失稳。底板宽度为 800 mm, 厚度为 40~50 mm, 翼板宽厚比较大, 更易出现局部屈曲。因此, 本文选用 60 m 跨

收稿日期: 2022-11-14

基金项目: 浙江省交通运输厅科技计划项目(2021034)

作者简介: 杨智敏(1966—), 男, 本科, 高级工程师, 从事交通工程检测管理工作。

表 1 钢板梁几何参数汇总

跨径 /m	主梁间距 /m	梁高 /m	高跨比	顶板厚 /mm	顶板宽 /mm	底板厚 /mm	底板宽 /mm	腹板厚 /mm	加劲肋厚 /mm	加劲肋间距 /m
3 × 30	4.7~5.1	1.4	0.047	28~36	600	30~55	650	20	12~18	1.65
3 × 40	4.7~5.1	1.9	0.048	28~36	600	32~60	700	20	16~25	1.5
3 × 50	4.7~5.1	2.5	0.050	30~50	600	36~50	700	24	18~25	2.5
3 × 60	4.7~5.1	3	0.050	30~60	600	40~50	800	28	16~28	2.5

径钢板梁为研究对象分析计算其施工阶段的整体及局部稳定性。

基本计算参数选用交通部 3 × 60 m 双向四车道工字组合连续梁桥,设计荷载为公路 -I 级。桥梁全宽为 26 m,分离式桥面布置,单幅桥面宽度为 12.75 m。采用三片钢主梁,单片钢主梁梁高 3 m,钢主梁中心距 5.1 m,上翼缘宽 0.6 m,下翼缘宽 0.7 m。在墩、台顶和跨中位置设置实腹式横向联结,跨间其他位置采用 K 形桁架式横向联结。主梁标准截面如图 1 所示。钢主梁采用工厂分节段预制,节段间采用高强度螺栓工地现场连接。桥面板为预制钢筋混凝土结构,后浇混凝土湿接缝。

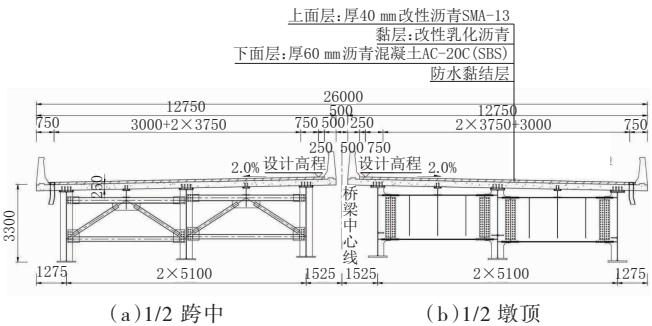


图 1 主梁标准截面图(单位:cm)

1.2 分析工况确定

交通部标准图中明确了上部结构的架设安装主要考虑 3 种方案:(1)对于桥跨数较多的主线桥梁,推荐采用架桥机施工方案。(2)对于跨河、跨谷和桥墩较高的主线桥梁,可采用在一岸进行主梁组拼,然后顶推就位的施工方案。若跨径较大,可根据需要设置临时墩支撑;其余地形条件可采用支架法施工方案。(3)对于支架架设方案,采用如下施工步骤:a. 拼接第 1 跨主梁,若现场起吊能力较强,可考虑半幅桥整孔吊装架设。若现场起吊能力有限,可分片架设,并及时安装横向联结系。为防止第一片钢梁架设完成后的侧翻,应对钢梁进行横向临时支撑。b. 在 1 号墩顶节段的接头处设置临时支架,将拼接好的第 2 跨主梁吊装就位,并在临时支架上完成与第 1 跨主梁的拼接。c. 在 2 号墩顶节段的接头处设置临时支

架,将拼接好的第 3 跨主梁吊装就位,并在临时支架上完成与第 2 跨主梁的拼接。至此,完成钢主梁的架设。

目前交通部标准图中推荐主梁节段长度不宜超过 12 m,但在实际施工时,临时支架位置受桥下交通或地质条件限制,节段长度将会增加。此外,从施工便利和成本上考虑,节段长度越大越有利。因此,本文选取分析参数时,简支吊装计算跨径选为 20~45 m,以每 5 m 一个工况;梁高取高跨比 1/15、1/17 和 1/20;横梁间距取 5 m、7.5 m 和 10 m。通过扩大参数分析,探讨简支吊装施工方法下,不同几何参数和施工因素对受力响应的影响规律。

1.3 有限元模型的建立

采用 ABAQUS 建立吊装过程有限元模型。由于本文研究分析关注于桥面板与钢梁形成整体共同受力之前的整个施工过程,研究对象集中在钢梁的受力特性分析,故仅需定义钢的材料属性。钢梁采用 Q355C 钢材,弹性模量 $E=2.0 \times 10^5$ MPa,屈服应力 $f_y=295$ MPa。钢主梁采用 S4R 四节点薄壳单元进行模拟,梁端约束定义与实际布置的支座形式相同。根据实际施工阶段,采用软件中 MODEL CHANGE 模块来实现对单元的“激活”与“钝化”,以此实现施工过程中钢梁的拼装,并对每一施工阶段的钢梁施加边界和荷载,建立了全桥施工过程有限元模型。施工阶段有限元模型如图 2 所示。

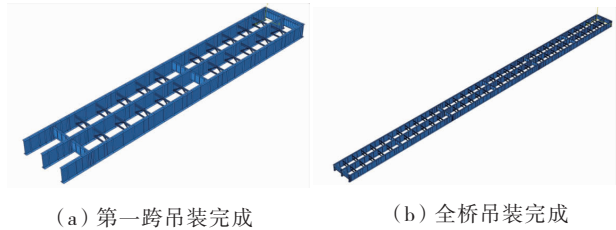


图 2 施工阶段有限元模型

结构稳定性分析通常包括特征值屈曲分析和后屈曲分析(非线性)^[9]。钢梁施工阶段的应力均处于弹性屈曲范围内,因此本文采用第一类特征值屈曲分析来进行钢梁稳定性评估。特征值屈曲计算出的稳

定系数 λ 定义如式(1)所示:

$$P_{cr}=\lambda P_{ref} \tag{1}$$

式中, P_{cr} 是相应的屈曲载荷; λ 是特征值; P_{ref} 是初始施加的参考荷载, 本文将钢梁自重作为初始参考荷载。

2 计算结构分析

2.1 不同吊装节段长度

分析不同节段长度下单梁架设稳定性, 跨径选取 20~45 m, 通过屈曲分析得到不同跨径下的失稳模式和稳定系数(见表 2)。屈曲模式如图 3 所示。

表 2 不同节段长度单梁特征屈曲计算结果

节段跨径 / m	稳定系数	屈曲模式
20	38.853	整体失稳、翼缘板屈曲
25	20.772	整体失稳、翼缘板屈曲
30	11.860	整体失稳
35	7.142	整体失稳
40	4.467	整体失稳
45	2.852	整体失稳

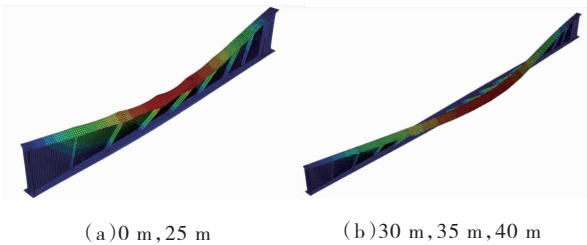


图 3 不同节段长度单梁失稳模式

当单梁跨径较小时, 其稳定性较好。其中, 在 20 m 和 25 m 跨径下, 钢梁呈现整体失稳且伴随翼缘板屈曲, 稳定系数分别为 38.853 和 20.772。此时钢梁能承受的极限荷载较大, 直到顶板发生屈曲时才达到整体侧向失稳状态, 具有较高的稳定性。当单梁跨径超过 30 m 后, 发生整体侧向失稳时不再伴随有翼缘板屈曲现象, 其能承受的极限荷载降低, 跨径每增大 5 m, 稳定性降低 40% 左右。当跨径达到 45 m 时, 稳定系数仅为 2.852。此时还未考虑钢梁初始缺陷和其他荷载的影响, 采用 45 m 节段架设钢梁稳定性较差。当单梁为 40 m 跨径时, 稳定系数为 4.467, 处于规范限值临界状态。

2.2 不同钢梁高度

选取高跨比 1/15、1/17、1/20, 即梁高分别为 4 m、3.5 m 和 3 m, 其中 3 m 为交通部通用图中的设计梁高。在钢板组合梁桥的架设过程中, 单梁阶段为最不利施工阶段。此时各横向联系未完成拼接, 主梁的约束较少, 处于相对不稳定状态。以单梁状态为基础,

在不调整板厚、翼缘宽度等参数下分析不同梁高单梁的稳定性。经计算分析, 不同工况下钢梁均呈现整体侧向失稳。不同梁高、不同跨径下主梁稳定系数汇总见表 3。

表 3 不同参数下稳定系数

节段跨径 / m	梁高 3 m	梁高 3.5 m	梁高 4 m
20	38.853	35.923	32.516
25	20.772	19.159	17.400
30	11.860	10.984	9.793
35	7.142	6.440	5.757
40	4.467	3.950	3.476
45	2.852	2.449	2.105

由表 3 结果可知, 相同节段跨径下, 随着梁高的增大, 稳定系数逐渐降低。在梁高 3 m 时, 跨径达到 40 m 时, 稳定系数为 4.467, 符合规范限值要求。梁高 3.5 m 工况下, 在跨径达到 40 m 时, 稳定系数为 3.950, 但此时钢梁为理想状态。若考虑初始缺陷和风荷载等影响, 稳定系数继续降低, 结构稳定性较差。节段跨径达到 40 m 时, 应密切关注钢梁单梁施工阶段的稳定性, 保证结构施工安全。

2.3 不同横梁间距受力分析

选取横梁间距为 5 m、7.5 m、10 m 和 15 m 建立 ABAQUS 有限元模型, 以架设完第 1 跨为例分析不同横梁间距下结构的稳定性, 得到不同横梁间距对应的一阶失稳模式, 如图 4 所示。

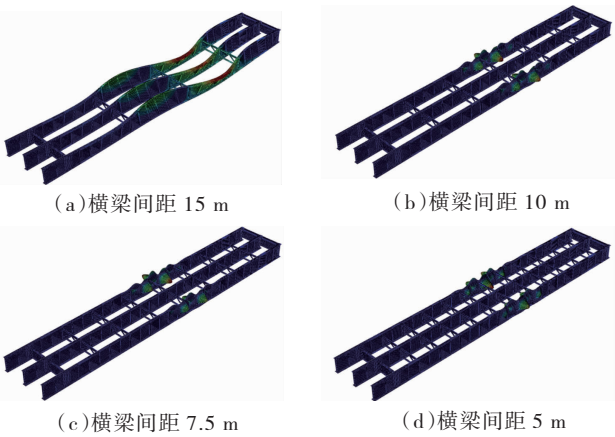


图 4 不同横梁间距多梁失稳模式

由图 4 可以看出, 随着横梁间距减小, 结构的一阶失稳模式由侧向弯扭失稳转变为翼缘板、腹板局部屈曲。将各工况下稳定系数整理见表 4。

由表 4 可知, 横梁间距 15 m 时, 结构稳定系数为 6.334, 屈曲模式表现为侧向弯扭失稳, 结构稳定性较差, 在实际工程中应避免一阶模式为整体失稳。

表 4 不同横梁间距特征屈曲计算结果

横梁间距 / m	稳定系数	屈曲模态
15	6.334	侧向弯扭失稳
10	10.767	翼缘板、腹板屈曲
7.5	10.762	翼缘板、腹板屈曲
5	10.768	翼缘板、腹板屈曲

当横梁间距缩短到 10 m 后,结构稳定系数达到 10.767,一阶屈曲模态由侧向弯扭失稳转变为翼缘板和腹板的局部屈曲。此时继续缩短横梁间距,结构的安全系数和屈曲模态均变化较小。可见,当横梁间距缩短到 10 m 后,主梁的侧向位移受到横梁约束,不再呈现弯扭失稳模态,屈曲模态表现为局部失稳。继续缩短横梁间距对稳定性影响不大,说明此时结构的稳定性主要由加劲肋的间距进行控制,横梁的约束对翼缘板和腹板的局部屈曲影响较小。交通部通用图中设计横梁间距为 5 m,可保证钢梁整体稳定。

3 结 论

本文对 60 m 跨径钢板组合梁桥吊装施工过程稳定性进行分析,得到如下主要结论:

(1)随着钢梁节段跨径增大,单梁稳定性降低,单梁节段跨径每增大 5 m,稳定性能降低约 40%,节段跨径为 40 m 时其稳定系数为 4.467,处于规范限

值临界状态。

(2)相同跨径下,稳定系数随着梁高增大而降低。节段跨径达到 40 m 时,钢梁稳定系数较低,应密切关注钢梁单梁施工阶段的稳定性,保证结构施工安全。

(3)横梁间距过大易导致钢梁发生侧向弯扭失稳。此时缩短横梁间距可以提高结构稳定性。横梁间距缩短到 10 m 后,失稳模态转变为局部失稳,结构稳定性主要由其自身构造控制,继续缩短横梁间距对稳定性影响较小。

参考文献:

[1] JTG/T D64—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
[3] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].
[3] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
[4] 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.
[5] 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.
[6] 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.
[7] 朱丹,范重,柴会娟,等.板件宽厚比对交叉钢梁稳定性影响研究[J].建筑钢结构进展,2021,23(8):67-75.
[8] 石雪飞,马海英,刘琛.双工字钢组合梁桥钢梁设计参数敏感性分析与优化[J].同济大学学报(自然科学版),2018,46(4):444-451.
[9] 施维,季云峰,余金山,等.横向联结对中小跨径钢板组合梁桥稳定性性能影响的分析[J].上海公路,2021(1):47-51.

《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