

DOI:10.16799/j.cnki.esdqyfh.2023.04.043

大跨度钢桁梁顶推施工横向抗倾覆研究

张全帅¹,王洪志¹,张宪胜²,任冰心²,刘波¹

(1.烟台大学,山东烟台264005;2.中铁十四局集团第四工程有限公司,山东济南250004)

摘要:桥梁的施工方法发展至今已不再是原来的单一选择,而是采用多种施工方法比对后的最优解,受限于地形、营运线等诸多因素的影响顶推施工成为许多钢结构桥梁施工的第一选择,因此对大跨度钢桁梁顶推施工的研究越来越重要。以滨州市某100 m钢桁梁顶推施工工程为例,基于有限元软件MIDAS/Civil对顶推施工过程中关键杆件的应力和挠度进行模拟分析并对钢桁梁的横向抗倾覆稳定性进行了参数化分析。结果表明:钢桁梁顶推施工过程中关键杆件的应力和挠度满足规范要求;钢桁梁的横向偏移对其抗倾覆稳定性影响较大;当风力等级大于6级时,对横向抗倾覆稳定系数有较大影响。

关键词:大跨度钢桁梁;拖拉式顶推施工;有限元分析;横向抗倾覆研究

中图分类号:U445.462

文献标志码:A

文章编号:1009-7716(2023)04-0160-04

0 引言

随着经济的快速发展,桥梁在现代社会扮演的角色愈发重要。目前桥梁常见的施工方法有悬臂施工法、支架现浇法、转体施工法,以及顶推施工法等^[1]。由于顶推施工法具有不影响交通运行、降低施工成本等诸多优点,成为许多钢结构桥梁施工的第一选择^[2]。

与其他桥梁施工方法不同,钢桁梁顶推施工过程中抗倾覆稳定性一直是大家比较关心的重点^[3-8]。国内外学者对抗倾覆稳定性做过许多研究,但大多针对钢箱梁的纵向抗倾覆稳定,对钢桁梁横向抗倾覆稳定的研究尚不充分。现以某工程100 m钢桁梁为例,对其顶推施工过程的应力及挠度进行分析计算,并对横向抗倾覆稳定进行研究。

1 工程概况

该桥为跨径100 m简支钢桁梁桥,全桥钢结构共计1600 t。100 m钢桁梁材料采用Q370qE钢材制造,由左右两片桁架及其上下的横向联结系组成。左右两片桁架的中心间距为25.7 m,每片桁架的高度均采用圆曲线变化,跨中处为圆曲线的最高点,此处桁高为16 m;支点处为圆曲线的最低点,此处桁高为11 m。钢桁梁节间分别长11.95 m和12.5 m,全桥共分为8个节间。根据现场施工环境,以及施工

要求,钢梁采用“逐段拼装、分步拖拉”的方案,利用旧桥4个桥墩与新桥2个主墩承台作为支撑点搭设纵向拖拉滑移支架如图1所示,并在一侧设置拼装平台,利用汽车吊吊装的方法进行安装,边安装,边拖拉。

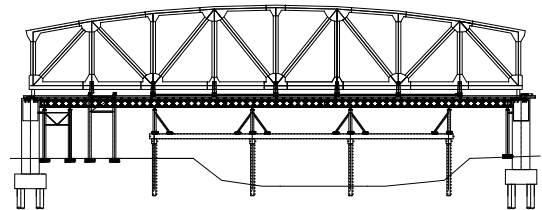


图1 100 m钢桁梁支架立面布置图

钢桁梁及支架横断面见图2所示,钢桁梁由上弦杆、下弦杆、腹杆、纵横梁、上平联、桥门架组成^[9]。上弦杆为闭口箱形截面,板厚24~28 mm。主桁上弦节点均采用整体节点。下弦杆为闭口箱形截面,板厚20~24 mm。腹杆分为闭口箱型截面和H型截面两种,板厚24~32 mm。支点处横梁采用箱形截面,截面腹板高1476~2436 mm,厚16 mm;顶板宽1000 mm,厚32 mm;下底板宽1000 mm,厚32 mm。非支点处节点横梁采用工字形截面,截面腹板高1484~2440 mm,厚16 mm,端部加厚至20 mm。纵梁为工字钢截面,横向间距在跨中处为2.9 m,在其余位置为2.8 m,共设有8道。纵梁截面腹板高1060 mm,厚12 mm;上、下翼缘板宽500 mm,厚20 mm。各杆件的编号见图3所示。

2 拖拉滑移系统总体概述

主桥桥位正下方8 m位置处存在一座5×20 m的旧桥,拆除旧桥端部的两个20 m桥跨,选择一端

收稿日期:2022-09-12

作者简介:张全帅(1998—),男,硕士在读,研究方向为桥梁工程。

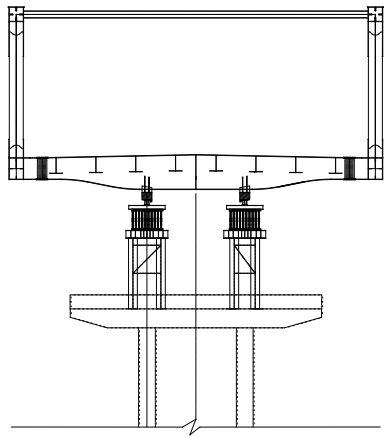


图2 100 m 钢桁梁支架横断面布置图

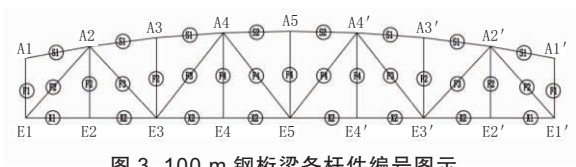


图3 100 m 钢桁梁各杆件编号图示

搭设钢管桩支架作为拼装平台,利用留存的 3×20 m的桥跨在桥面上搭设钢管桩贝雷片支架作为拖拉平台,拼装平台上利用汽车吊进行杆件散拼,散拼两个节间后利用千斤顶进行拖拉,拖拉一个节间后再继续进行散拼,直到桥梁拖拉至设计位置。

拖拉滑移支架竖向支撑采用 $\phi 630 \times 10$ mm钢管,按5跨布置,最大跨度20 m,与旧桥跨度一致;钢管桩顶部设置桩帽与分配梁焊接,分配梁采用三拼I45a工字钢,并在贝雷片摆放区域和桩顶设置加劲板,用以支撑点的局部补强,避免局部变形屈曲。分配梁上方布置一组9榀贝雷片支架,贝雷片均设置加强弦杆,并在端部和底部设置450花窗连接成整体,确保贝雷片稳定性。同时,在贝雷片与分配梁连接区域设置卡扣,防止贝雷片拖拉过程中出现整体纵移。此外,拖拉支架中的贝雷片的竖杆并未全部支撑在分配梁区域,为达到荷载传递的效果,在分配梁未支撑在竖杆的区域内,设置型钢框架作为竖向传力构件。贝雷梁顶部设置滑道分配梁双拼[36槽钢,单点双拼布置,间距1.5 m;滑道梁采用三拼I45b工字钢,横桥向设置两道,均沿纵桥向通长布置。每个滑移轨道各有两组钢管桩,钢管桩架立在既有桥面上,并在旧桥空心板隔板位置处植筋处理。为了抵消拖拉过程中的桩顶水平力在钢管一侧设置 $\phi 300 \times 8$ mm斜支腿。滑道面涂抹黄油,横梁底设置调平垫块,垫块与滑道接触面设置四氟滑板,减少拖拉摩阻力,同时设置横向限位。限位装置做成前宽后窄,利于拖拉,保证拖拉过程中横向线形。牵引系统设置在对岸侧,对称各设置2组200 t连续千斤顶,共计4套连

续千斤顶。牵引索采用 $\Phi 15.24$ 钢绞线,每套千斤顶采用8根,共计32根。

拼装支架采用钢管桩4桩平台支架,钢管桩管径为 $\phi 630 \times 10$ mm,连接系采用 $\phi 300 \times 8$ mm,搭设高度为12.25 m,桩顶分配梁采用三拼I45a工字钢,基础采用扩大基础,尺寸为 $2 \text{ m} \times 2 \text{ m} \times 0.8 \text{ m}$ 。

此次拖拉点位布置在北岸11#主墩系梁处,拖拉平台滑道梁延伸至系梁顶,在系梁顶预埋锚固筋,使滑道梁固定,同时预埋反力座,作为拖拉千斤顶过程中的支撑点。拖拉牵引具体工艺为:滑道梁通过垫块支撑在墩顶上,反力座在滑道梁上,千斤顶的水平力只作用在滑道梁上,未传递至墩身,对墩身无水平力的作用。

为防止在拖拉过程中,千斤顶拖拉不同步,造成钢桁梁受力不均,从而可能出现的意外事故,在滑块上设置限位装置,同时在既有桥梁两侧设置4组防倾覆支架,防倾覆支架顶标高比钢桁梁下弦杆低5 cm。

3 拖拉过程计算分析

根据某工程100 m钢桁梁的拼装拖拉施工顺序,采用有限元分析软件MIDAS/Civil建立钢管立柱、分配梁、钢管立柱连接系、纵梁及横梁整体模型,并与主体钢桁梁进行竖向连接。根据实际方案共划分为48个施工阶段。钢桁梁部分施工阶段模型见图4所示。

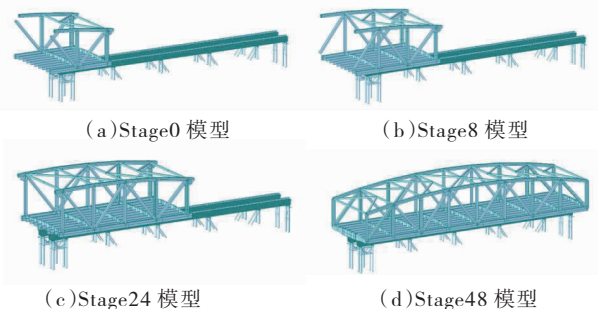


图4 100 m 钢桁梁部分施工阶段模型

3.1 强度分析

与其他施工方式不同,此次钢桁梁顶推施工采用边拼装边拖拉的施工方式。在施工过程中多次出现体系转换,对钢桁梁及下部支架的应力产生一定影响。为了保证施工安全,对钢桁梁拖拉施工过程中的各个关键工况的杆件应力进行采集分析,结果见图5所示。

根据以上计算分析,钢桁梁在拖拉过程中腹杆承受的最大组合应力为54.2 MPa,出现在A'2E'2杆件滑移49.5 m时的工况;横梁承受的最大组合应

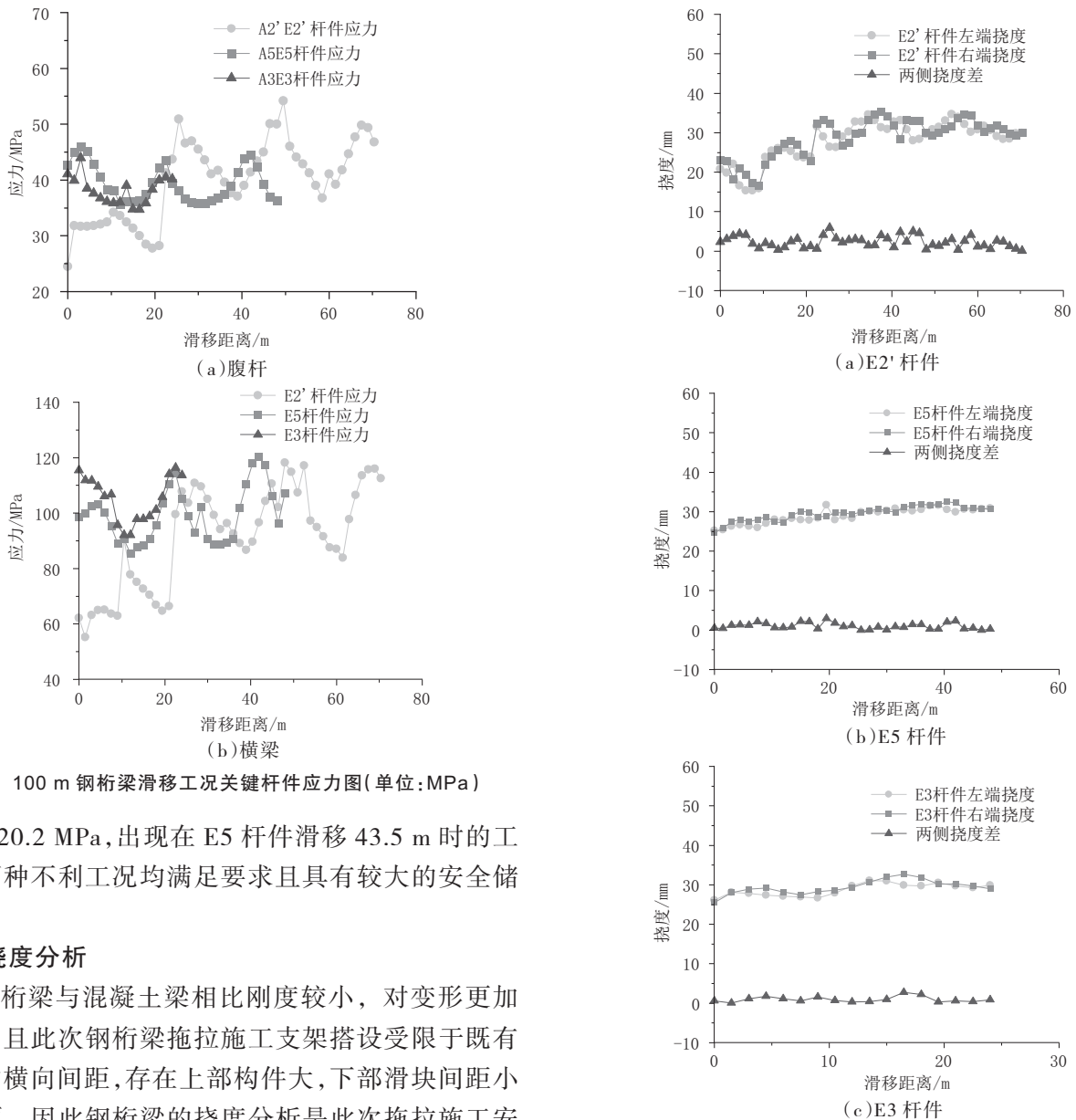


图5 100 m 钢桁梁滑移工况关键杆件应力图(单位:MPa)

力为 120.2 MPa,出现在 E5 杆件滑移 43.5 m 时的工况,两种不利工况均满足要求且具有较大的安全储备。

3.2 挠度分析

钢桁梁与混凝土梁相比刚度较小,对变形更加敏感,且此次钢桁梁拖拉施工支架搭设受限于既有桥墩的横向间距,存在上部构件大,下部滑块间距小的问题,因此钢桁梁的挠度分析是此次拖拉施工安全的关键。对 E2'、E5、E3 横梁在滑移过程中两侧的挠度及两侧挠度的差值进行分析,结果见图 6 所示。

根据公路钢结构桥梁设计规范^[10]的要求,对于梁的悬臂端部的最大挠度不应超过 L/300。通过以上计算分析,钢桁梁在拖拉过程中横梁最大挠度为 34.7 mm,满足规范要求。两侧挠度最大差值为 5.9 mm,差值与两侧挠度值相比较小,符合安全要求。

4 横向抗倾覆稳定分析

根据公路钢结构桥梁设计规范^[10]的要求,横向抗倾覆应满足下式要求:

$$\frac{\sum S_{bk,i}}{\sum S_{sk,i}} \geq k_{qf} \quad (1)$$

式中: k_{qf} 为横向抗倾稳定性系数,取 $k_{qf}=2.5$; $\sum S_{bk,i}$ 为使上部结构稳定的作用基本组合(分项系数均为

图6 100 m 钢桁梁滑移工况关键杆件挠度图

1.0)的效应设计值; $\sum S_{sk,i}$ 为使上部结构失稳的作用基本组合(分项系数均为 1.0)的效应设计值。

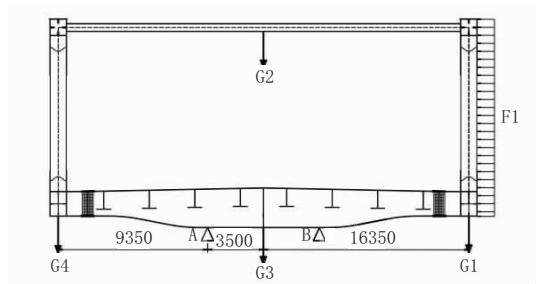
由于公路钢结构桥梁设计规范^[10]中是对成桥持续状态下的横向抗倾覆的规定,在营运过程中可能会出现严重的超载和偏载的情况,而在施工过程中各施工荷载较为明确,仍选取抗倾覆系数为 2.5 过于保守。因此在参考废止的公路桥涵钢结构及木结构设计规范^[11]中对桥跨结构在施工架设期横向抗倾覆系数 $K=1.3$ 的取值及风荷载等不确定因素,将钢桁梁在拖拉及拼装施工工况的横向抗倾覆系数 K 取为 1.5。

4.1 计算模型

4.1.1 受力简图

为方便分析钢桁梁的结构受力,先做以下假定:

- (1)钢桁梁视为刚体,不考虑其变形。
 - (2)钢桁梁刚度足够大,不会发生局部破坏和局部失稳。
 - (3)A点为理想铰支座,B点为仅受压支座。
- 受力简化模型如图7所示。



(G1- 右侧弦杆及腹杆自重, G2- 上平联自重, G3- 横梁及纵梁自重, G4- 右侧弦杆及腹杆自重, F1- 风荷载)

图7 100 m 钢桁梁横断面受力图(单位:mm)

4.1.2 荷载分析

(1)自重

自重主要包括钢桁梁上、下弦杆、腹杆、纵横梁、上平联及桥门架杆件的重量。

(2)风荷载

根据建筑结构荷载规范^[12]中对多榀桁架风荷载标准值的取值规定,作用在钢桁梁上的风荷载应满足下式要求:

$$w_k = \beta_z \mu_{stw} \mu_z w_0 \quad (2)$$

式中: w_k 为风荷载标准值; β_z 为高度 z 处的风振系数; μ_{stw} 为风荷载体型系数; μ_z 为风压高度变化系数; w_0 为基本风压。

4.2 参数化分析

针对在钢桁梁拖拉施工过程中经常出现的横向偏位、风荷载等问题,进行参数化分析,明确这些因素对抗倾覆稳定性的影响^[13]。

4.2.1 横向偏位对倾覆稳定性的影响

钢桁梁的滑移施工过程依靠河对岸对称布置的4套连续千斤顶及钢绞线组成的牵引系统。由于实际拖拉过程结构受力多变,难免出现两台千斤顶同步性及两组钢绞线松紧程度的差别,导致钢桁梁可能出现横向偏位的问题。

现通过考虑向一侧横向偏移0、10、20、30 cm的情况下与抗倾覆系数的关系,确定横向偏移对抗倾覆稳定系数的影响,结果见图8所示。

由图8可知:钢桁梁的横向偏移对其抗倾覆稳定性有较大影响,抗倾覆稳定性随偏移量的加大明显下降。当横向偏移达到30 cm时,稳定系数低至2.04,趋近于安全系数1.5,结构抗倾覆能力较差。

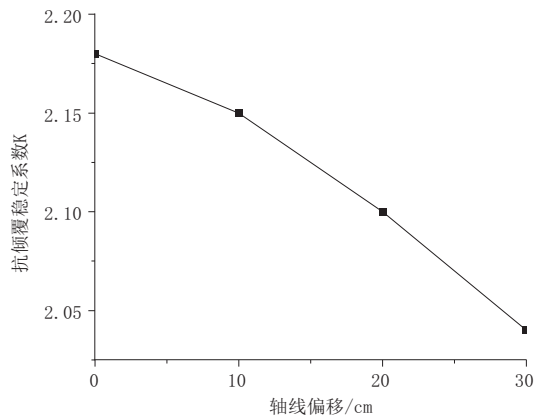


图8 横向偏移对抗倾覆稳定系数的影响图

4.2.2 风荷载对倾覆稳定性的影响

由于此次拖拉施工下方为河流区域,有较大风荷载,因此风荷载也是对钢桁梁的抗倾覆稳定性产生影响的重要因素。现通过对无风、4级风、6级风、8级风及12级风作用时钢桁梁的稳定系数进行分析。分析结果见图9所示。

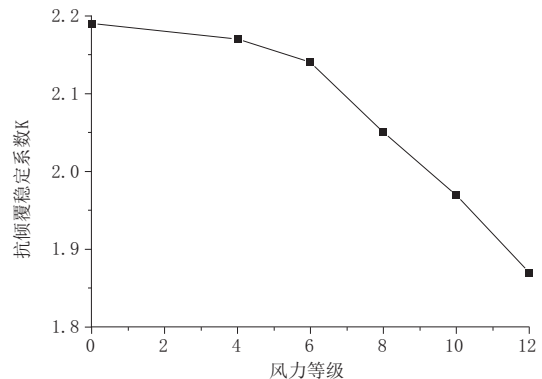


图9 风力等级对抗倾覆稳定系数影响图

由图9可知:抗倾覆系数随风力等级的增大而减小;在风力等级低于6级时,抗倾覆稳定系数减小较为缓慢,抗倾覆稳定性较好;当风力等级大于6级时,抗倾覆稳定系数减小幅度较大,抗倾覆稳定性较差。因此建议在现场拖拉施工过程中,当风力等级超过6级时立即停止施工。

5 结语

以某工程100 m钢桁梁为背景,通过对钢桁梁拖拉施工过程中的应力和挠度进行数据采集与分析,以及对该桥横向抗倾覆稳定进行参数化分析后得出以下结论:

- (1)在拖拉施工过程中,钢桁梁的应力和挠度均满足规范要求,并且有较大的安全储备。
- (2)钢桁梁的横向偏移对其抗倾覆稳定性的影响较大。在拖拉施工过程中,应严格控制横向的偏移,并应提前设置发生较大偏位后采取的有效措施。

(下转第171页)

颖,体现了前海“先行、创新”特色,成为前海新的网红打卡地。



图 18 成桥后夜间实景照片

6 结 语

空间发散独拱波浪式钢架组合体系景观桥,其钢拱为三根空间发散拱肋,同时拱肋耳板需要与钢架、钢横联、桥面锚点精准定位,配合要求精确制造

难度极高。本文对桥面上部结构的钢拱、钢架、钢横联的制造难点进行了分区介绍并针对其难点制定出相应的解决办法,起到了良好的效果。深圳前海湾景观桥顺利完成建造,实现预期的景观效果,体现出深圳前海区“先行、创新”特色。该桥制造精度和质量达到了较高的水平,实现了良好的社会效益。

参考文献:

- [1] 张绍银.国内外景观桥梁设计现状及发展[J].科技风,2009(15):263.
- [2] 李丰群.深圳前海合作区梦海前海湾大桥设计[J].现代交通技术,2019,16(3):51-54.
- [3] 靳琛.城市景观桥及其周边环境协调机制研究[J].华中建筑,2012,30(9):119-121.
- [4] 严亚飞,周喜,沈念龙,等.大跨度空间异型连续梁景观桥制作技术[J].焊接技术,2017,46(9):21-24.
- [5] 高波,李叶茂.重庆千厮门嘉陵江大桥钢桁梁制造关键技术介绍[J].公路交通技术,2014(6):117-121.

~~~~~  
(上接第 163 页)

(3)在拖拉过程中,应配备相应的风速检测仪器,当风力等级超过 6 级时现场应立即停止施工。

### 参考文献:

- [1] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国公路学,2016,29(2):32-43.
- [2] 项敏.大跨度钢桁梁顶推滑动体系的研究与应用[J].铁道建筑,2017,57(12):21-24.
- [3] 黄成国,朱铮栋,唐益军,李枝军.曲线钢箱梁桥步履式顶推施工横向倾覆稳定性影响因素的分析[J].南京工业大学学报(自然科学版),2020,42(3):399-404.
- [4] 刘军华.大跨径梁拱组合桥拱肋顶推力学性能研究[J].公路,2021,66(4):176-181.
- [5] 杨江国.钢桁梁顶推施工的技术应用[J].城市道桥与防洪,2018(8):222-223,234.
- [6] 车铁成,邓涛,王巍,龚洪苇,周越良.小半径曲线钢箱梁桥顶推施工箱梁横向倾覆稳定性研究[J].水利与建筑工程学报,2021,19(2):144-148.
- [7] 廖应先,达勇.小半径大坡度连续钢箱梁顶推施工分析[J].湖南交通科技,2016,42(3):142-145.
- [8] 杨江国.钢桁梁顶推施工的技术应用[J].城市道桥与防洪,2018(8):222-223,234.
- [9] 王玲,王韬,王荣霞.大跨径连续钢桁梁桥悬臂拼装线形控制方法研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2017,36(11):11-15.
- [10] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].人民交通出版社,2018.
- [11] JTG 025—86,公路桥涵钢结构及木结构设计规范[S].人民交通出版社,1986.
- [12] GB 50009—2012,建筑结构荷载规范[S].中国建筑工业出版社,2012.