

城市高架桥多联超长钢箱梁顶推施工技术

肖俊,王若愚*

(中建三局第一建设工程有限责任公司,湖北 武汉 430048)

摘要:桥梁工程中,顶推技术在跨越公路、铁路、防洪大堤以及城市繁华街道等情况下有较大优势,在实际施工中由于结构、现场环境等原因,也会遇到各类技术难题。该文结合工程实践,对多联超长城市高架桥钢箱梁顶推施工技术难点予以探究,包括主梁顶推过程中的失稳问题、合理的导梁长度、联与联之间的合理连接等。形成了一套系统的分析方法,可解决工程施工中的技术难点,保证工程的顺利实施。

关键词:桥梁工程;钢箱梁;失稳;顶推施工

中图分类号:U445

文献标志码:A

0 引言

顶推施工技术^[1-4]具有高空作业时间短、施工人员相对安全、施工过程不阻断交通等优点,尤其是在跨越公路、铁路、防洪大堤以及城市繁华街道等情况下有较大优势。因具体的施工情况不同,顶推施工技术有着不同的施工侧重点,也会遇到各类技术难点。

对于多联超长城市高架桥,顶推施工过程中技术难点主要有:①需要顶推的钢箱梁长度较长,滑道支撑位置竖向反力大,可能主梁顶推过程中会出现失稳;②导梁的选择对于桥梁在顶推施工过程中的受力有着重大的影响;③多联超长结构顶推过程中联与联之间的合理连接方式选择;④顶推过程中永久墩、临时墩及滑道梁容易出现失稳或破坏情况^[5-10]。针对以上问题,该文结合西安市新兴南路工程PPP项目实践,对相关施工难点予以探究。

1 工程概况

该工程大跨径桥梁属于高架桥,桥梁分为南北两幅,北幅桥起点里程为NK2+304.509,终点里程

NK3+195.509,桥梁总长891 m。桥梁跨径布置为:3×35 m(第一联)+3×35 m(第二联)+3×35 m(第三联)+3×35 m(第四联)+(48+60+48) m(第五联)+3×35 m(第六联)+3×35 m(第七联)+3×35 m(第八联)。除第五联为连续变截面钢箱梁外,其余联均为等截面钢箱梁。钢箱梁主受力纵梁及横梁采用闭口箱式截面,单片纵梁宽2.5 m;中横梁宽2.5 m;端横梁宽1.25 m。中部敞口部分桥面板采用正交异性钢桥面体系,加劲肋采用条肋,横隔板采用带底衬板的倒T形横隔板,横隔板和两侧闭口钢箱室的连接位置变高至全梁高,并设置圆倒角。闭口箱室内部横隔板采用环形或实心两种。主梁标准断面示意图如图1所示。

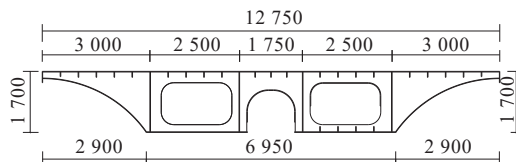


图1 主梁标准断面示意图(单位:mm)

南、北两幅桥均宽12.75 m,两幅桥走向基本平行,中央净距16 m,桥梁总面积22 720.5 m²。材质为Q345D、板厚为16 mm(支点加强段18 mm),单幅质量约6 500 t,共重约13 000 t。

收稿日期:2022-11-13

基金项目:黄冈师范学院博士基金项目(编号:2042018061)

作者简介:肖俊,男,讲师.E-mail:helloxj2003@163.com

*通信作者:王若愚,男,工程师.E-mail:393926908@qq.com

2 施工总体思路

根据现场工期及进度情况,南幅及变高联采用“原位吊装”施工(在此不作详述),本文主要介绍北幅标准联“顶推法”施工方案。

根据现场工期计划,顶推钢箱梁为一~四、六~八联,且上述联段均为标准联,每联为3跨,跨距为(35+35+35)m。

根据钢箱梁分段情况,结合现场墩柱施工情况,将钢箱梁施工顺序划分如图2所示。

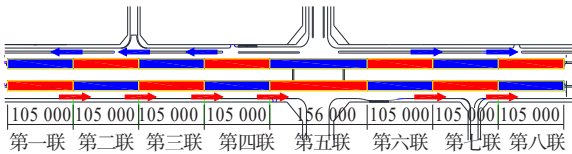


图2 钢箱梁分区示意图(单位:mm)

在第四联、第六联区域搭设组装平台,并依次安装顶推设备。第一~三联钢箱梁箱体依次在第四联组装平台吊装焊接完成后顶推至图纸要求区域,第四联钢箱梁箱体吊装焊接卸载完成后拆除其下方组装平台。同理,第七、八联钢箱梁箱体依次在第六联组装平台吊装焊接完成后顶推至图纸要求区域,第六联钢箱梁箱体吊装焊接卸载完成后拆除其下方组装平台。钢箱梁箱体就位后,钢箱梁悬臂及防撞护栏采用原位吊装。

施工期间,主要采用一台130 t履带吊进行施工。施工前期,采用一台汽车吊或履带吊在计划施工区域搭设组装平台。当箱梁运到现场后,由130 t履带吊吊装钢箱梁构件。钢箱梁吊装后,及时穿插焊接探伤等工作。每一联顶推施工就位后及时卸载,然后开展附属结构及防腐涂料流水施工。

3 施工要点及方法

3.1 主梁顶推施工技术要点

该工程需要顶推的钢箱梁长度较长,滑道支撑位置竖向反力大,主梁顶推过程中可能会出现失稳,如何保证不失稳,是主梁顶推施工技术要点之一。

同时导梁长度的选取十分关键,导梁长可减少主梁悬臂负弯矩,但过长则会导致导梁与箱梁接头

处负弯矩和支反力的相应增加;导梁过短,则会增加主梁的施工负弯矩。故合理的导梁长度也是主梁顶推施工技术关键点,需关注。

(1) 不利工况的确定

局部最大悬臂状态是顶推施工的关键控制状态,在顶推钢箱梁前端设置前导梁,顶推过程中顶推联与邻近联焊接在一起,顶推最大悬臂状态出现在前导梁到达桥墩之前,取该状态为不利工况。

(2) 加劲板的确定

由于顶推过程中钢箱梁不可避免地会横向偏位,如果滑道梁支撑位置不设竖向加劲肋进行局部刚度加强,很可能发生屈曲失稳。为保证主梁累积顶推过程中的稳定性,考虑对钢箱内腹板内侧增加加劲板,分别选取300 mm×100 mm×16 mm(加劲板1)、1 700 mm×100 mm×16 mm(加劲板2)两种板高进行分析。

利用有限元分析软件建立钢箱梁及导梁模型,梁段有限元模型选用Shell 181壳单元、Beam 4梁单元。模型几何尺寸与设计图纸一致,钢材弹性模量为210 GPa,泊松比 $\nu=0.3$,重度取78.5 kN/m³。

分别计算两种加劲板情况下最大悬臂状态应力水平,部分计算结果如表1所示。

表1 两种加劲板情况下最大悬臂状态应力水平 MPa

加劲板	钢箱梁	滑道附近	钢箱梁内	钢箱梁内	钢箱梁	钢箱梁内
	最大压	底板纵向	腹板纵向	腹板竖向	内腹板最	腹板最大
	应力	最大压应力	最大压应力	最大压应力	大剪应力	Miss应力
1	-188.64	-188.64	-147.65	-308.52	84.84	275.76
2	-136.65	-136.65	-116.84	-249.85	61.39	256.18

同时进行稳定性验算,加劲板1情况下,第5、6阶荷载屈曲系数小于5,不满足规范要求;加劲板2情况下,前10阶荷载屈曲系数均大于5,满足规范要求。

通过对钢箱内腹板内侧增加两种板高计算结果进行比较,最终选择加劲板2对钢箱梁进行加劲。

(3) 导梁长度选取

在加劲板确定计算中,导梁长度为17.5 m,在计算时滑道梁处局部竖向压应力最大为-249.85 MPa,但区域较小。为确保顶推安全,将原有导梁加长至22.5 m,进行计算分析。

为建模方便,导梁加长段5 m用集中荷载模拟,在导梁前端施加刚性域,集中荷载施加在Mass单元

上,同时刚性域可代替导梁钢管横撑。

计算可知:各关键部位应力满足相关规范要求,最终导梁长度选取为 22.5 m。

3.2 顶推阶段联与联之间合理连接施工技术要点

钢箱梁每联之间存在 16 cm 伸缩缝,累加顶推时联与联之间需要连接。

3.2.1 连接设计

考虑在钢箱梁梁端腹板、肋板位置采用 100 cm×15 cm×1.6 cm 码板进行焊接连接,焊缝为双面坡口焊全熔透。

原设计如图 3 所示,在底板滑道梁位置也焊接码板,这样顶推至联与联连接处时码板前端会顶在滑道梁上,无法继续顶推,因此,设计应删去滑道梁处 4 块码板。

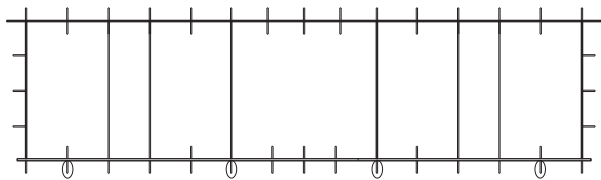


图 3 联与联码板连接示意图

3.2.2 不利工况的确定

顶推过程中,连接截面顶推至跨中时,正弯矩最大,顶推至滑道梁时,负弯矩最大,以这两个工况为控制工况建立 6 跨连续梁进行验算,其中连接截面两侧各 3 跨。

3.2.3 工况验算

码板连接截面顶推至跨中时,正弯矩最大,位于连接截面位置,选取码板连接截面处一段钢箱梁进行验算,部分计算结果如表 2 所示。

表 2 钢箱梁顶推至跨中部分计算结果(最大值)

码板竖向挠度/ mm	钢箱梁竖向 挠度/mm	钢箱梁纵向拉 应力/MPa	钢箱梁压 应力/MPa
5.2	5.2	71.88	50.1

由表 2 可知:纵向最大拉应力位于钢箱梁底板码板连接截面位置,最大压应力位于钢箱梁顶板码板连接截面位置。

连接截面顶推至滑道梁时,负弯矩最大,位于连接截面位置,选取码板连接截面处一段钢箱梁进行验算,部分计算结果如表 3 所示。

由表 3 可知:纵向最大拉应力位于钢箱梁顶板码

表 3 钢箱梁顶推至跨中部分计算结果(最大值)

钢箱梁纵向拉应力/MPa	钢箱梁压应力/MPa
73.5	109.34

板连接截面位置,最大压应力位于钢箱梁底板码板连接截面位置。

由相关计算结果可知:该连接方式的设计满足相关要求。

3.2.4 顶推阶段纠偏措施

(1) 在各永久墩墩顶两侧对称安装横向导向钢架,设置相应横向限位装置。在横向限位装置的下方设置横向纠偏千斤顶进行横向纠偏。

(2) 在每幅顶推梁横向纠偏千斤顶共设置 2 对共 4 台,在梁的前后两端均设置 1 对纠偏千斤顶。纠偏千斤顶的位置应根据梁体的顶推距离及时进行调整。

(3) 纠偏千斤顶采用 20 t 螺旋千斤顶。

(4) 横向纠偏千斤顶依据梁体在顶推过程中的中线偏差进行纠偏,向相反的方向进行纠偏,中线偏差不得大于 5 cm。

3.3 顶推阶段支撑体系施工技术要点

本工程钢箱梁截面整体偏小,如采用多点布置,空间上容易产生碰撞,同时对多台设备的同步性要求增加,故考虑采用单点施加顶推力的方法。根据相关验算结果,永久墩柱无法承受穿心千斤顶的支座反力,所以增加一组临时墩作为千斤顶反力座,放置顶推千斤顶。

永久墩、临时墩作为顶推阶段支撑结构,受水平摩阻力以及竖向力作用(钢箱移动产生),容易出现失稳或破坏情况,需对永久墩进行相关验算,对临时墩进行设计,以保证满足顶推阶段要求;同时需对滑道梁进行相关验算。现场实物如图 4 所示。



图 4 永久墩与临时墩

3.3.1 永久墩验算

对于未布置千斤顶的永久墩,其全过程仅受钢箱移动产生的水平摩阻力以及竖向力作用。因此,墩身抗拉、抗压验算仅需考虑水平摩阻力以及竖向力。

当导梁前端即将触及9[#]墩时,钢箱梁将会出现一个35 m的最大悬臂,如图5所示,此时10[#]墩将受到最大竖向力与最大水平摩阻力的作用,为最不利工况。

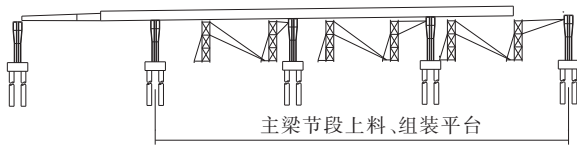


图5 顶推示意图

根据主梁顶推施工验算结果,当出现最大悬臂(35 m)时,可以获得10[#]墩的最不利荷载工况,如表4所示。

表4 最不利荷载工况

滑道编号	竖向反力/kN	摩阻系数	水平力/kN
1 [#] 边滑道	-41.99	0.1	4.199
2 [#] 中滑道	-993.29		99.329
3 [#] 中滑道	-992.76		99.276
4 [#] 边滑道	-42.21		4.221

永久墩计算结果如图6所示。

从图6可知:永久墩最大压应力为-2.89 MPa,最小压应力为-0.20 MPa;最大拉应力为1.13 MPa,最小拉应力为-0.2 MPa。满足相关规范要求。

根据以上桥墩在顶推工况下的计算结果,桥墩上设置滑道梁仅承受顶推过程中的摩阻力及顶推过程中竖向承载力,桥墩能够满足顶推过程的要求。若将千斤顶反力座设置在桥墩上,能够满足单联(3×35 m)钢箱梁顶推要求,单个桥墩仅能承受20 t水平力,无法满足三联钢箱梁顶推(100 t水平力)要求,因此需设置一个临时墩来设置千斤顶反力座,放置顶推千斤顶来满足顶推施工的要求。

3.3.2 临时墩设计

依据图纸要求将临时墩高度定为10.80 m,主管间距为3.0 m,斜撑高度为3.0 m。根据主梁顶推施工验算结果,取总的水平方向摩阻力,将其分摊两个反力座;临时墩底部定义为固结。计算模型如图7所示。

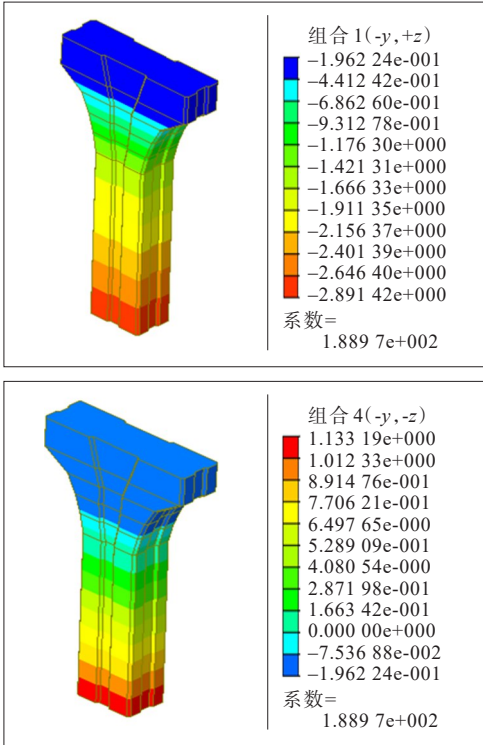


图6 永久墩计算结果(单位:MPa)

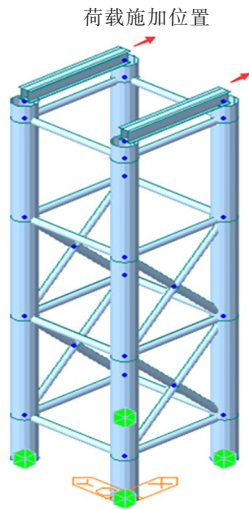
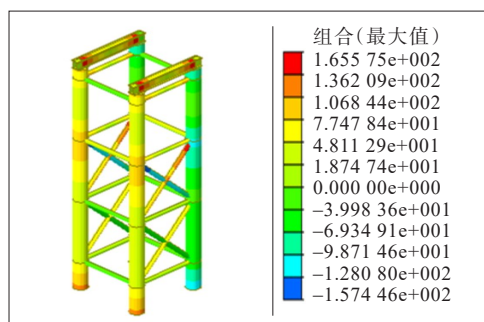


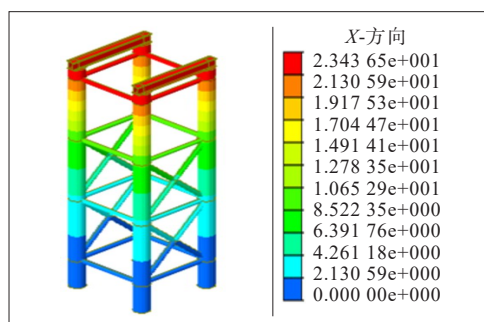
图7 临时墩模型

选取临时墩支架主管的直径为609 mm,壁厚为16 mm;支管直径为209 mm,在侧面上部斜向钢管的壁厚为5 mm,其余支管壁厚为5 mm(材料采用Q235);反力支座截面为2HN368×175×14×20。对临时墩在顶推施工过程中的最不利荷载工况进行验算,相关计算结果如图8所示。

从图8可以看到:临时钢支架最不利位置出现在顶推方向、顶部斜支管与主管的连接位置、反力座与主管连接位置以及主管与基础的连接位置。整体会



(a) 应力(单位:MPa)



(b) 变形(单位:mm)

图8 临时墩应力及变形结果

出现的最大组合应力为 165.6 MPa, -157.4 MPa。根据规范要求,板厚大于 16 mm、小于 40 mm 钢材的抗拉压强度设计值为 205 MPa,满足规范要求;顶推方向上最大水平位移为 23.4 mm,最大竖向位移为 -2.3 mm,满足规范要求;屈曲结果满足相关要求。

需进行屈曲分析、临时墩钢管与承台基础连接验算。通过验算,本工程临时墩设计满足顶推阶段技术要求。

需要对临时墩基础连接进行设计。临时墩基础与承台之间采用化学锚栓的方法进行连接,对于承压的柱脚采用 M20 的化学锚栓,对于抗拉的柱脚采用 M30 的化学锚栓,通过相关强度验算,满足要求。

3.3.3 滑道梁验算

根据最不利原则,选取高度最高的 N16 号墩上滑道梁进行建模验算,该滑道梁结构布置见图 9,规格尺寸如表 5 所示。

通过钢箱梁整联模型及钢导梁计算分析,可获得各滑道梁对钢箱梁的支承反力,计算分析可知,在最大悬臂状态,近导梁侧支撑截面中滑道处滑道梁对钢箱梁竖向支撑反力最大。运用 Ansys 建立滑道梁足尺有限元模型,考虑到实际顶推施工中可能存在个别支撑脱空以及施工与设计存在差异等情况,

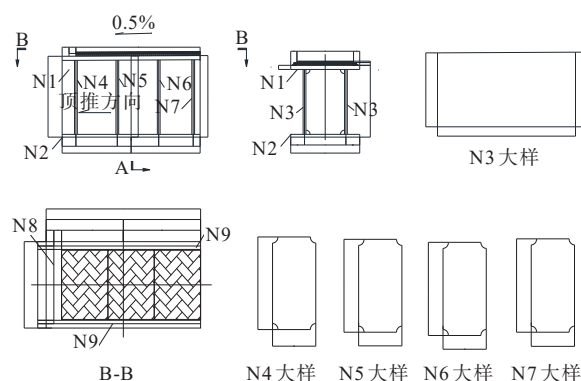


图9 滑道梁结构布置图

表5 工程数量表(单个滑道梁)

编号	规格/(mm×mm×mm)	数量/个	单重/kg	总重/kg
N1	□500×1 000×30	1	117.75	117.75
N2	□500×1 000×20	1	78.50	78.50
N3	□540.5×1 000×30	2	84.86	169.72
N4	□280×536×16	1	18.85	18.85
N5	□280×537.5×16	1	18.90	18.90
N6	□280×539.1×16	1	18.96	18.96
N7	□280×540.3×16	1	19.00	19.00
N8	□50×410×20	1	3.22	3.22
N9	□20×950×20	2	2.98	5.96
N10	□300×400×30(滑板)	3		

Q235B 钢材合计:450.84 kg,滑板合计:3块

N16号桥墩中滑道2个共计:Q235B 钢材合计:901.68 kg,滑板:6块

拟按 2 倍的最大竖向支撑反力均布施加在滑道梁承压面上;同时取一定的顶推摩擦阻力,施加在滑道梁与钢箱梁接触面上。通过有限元分析计算,部分计算结果如图 10、11 所示。

从相关计算结果可知,在计算荷载工况下,钢滑道梁变形很小,几乎可以忽略不计;最大压应力为 60 MPa 左右,安全系数足够,符合验算要求。同时需要考虑滑块承载力的验算。

3.4 主要监控项目控制值及满足程度

根据《公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范》(JTG 3362—2018)、《钢结构设计规范》(GB 50017—2017)、《城市桥梁工程施工与质量验收规范》(CJJ2 2008)、《公路桥涵施工技术规范》(JTG/T 3650—2020)和《公路工程质量检验评定标准》(JTG F80/1—2017)等的要求,对相关项目进行现场监测,主要监控项目控制值及满足程度见表 6。

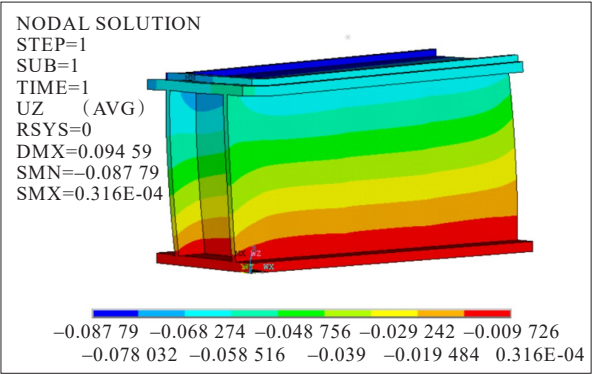


图 10 滑道梁变形结果(单位:m)

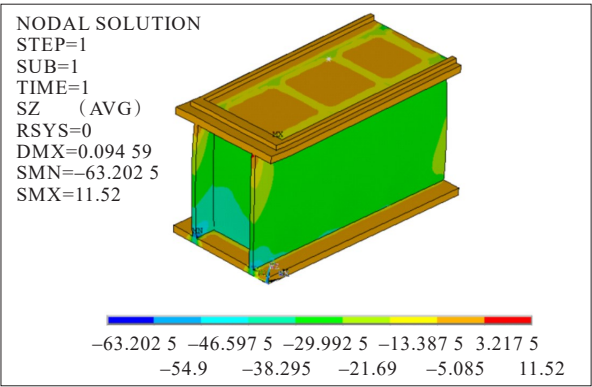


图 11 滑道梁竖向应力结果(单位:MPa)

表 6 主要监控项目控制值及满足程度

监控项目	控制值	满足程度
永久混凝土墩墩顶位移	<6 mm	满足
永久混凝土墩墩底拉应力	≤1.65 MPa	满足
永久混凝土墩墩底压应力	<18.4 MPa	满足
千斤顶钢管反力临时墩墩底应力	≤165 MPa	满足
钢箱梁应力	拉应力<205 MPa	满足
	压应力<205 MPa	

由表6可知:本次顶推施工的方法和工艺安全可靠,能保证施工过程顺利完成。

4 结语

本文以实际工程为例,对多联超长城市高架桥钢箱梁顶推施工技术进行探讨,运用有限元软件建立合理结构模型,解决了主梁顶推过程中失稳问题;确定了合理的导梁长度及多联超长结构顶推过程中联与联之间的合理连接方式;同时对相关支撑体系进行了设计和验算。相关计算结果与监测结果一致,形成了一套系统的分析方法,解决了本工程的技术难点,保证了工程的顺利实施。

参考文献:

- [1] 严任苗.基于全对称悬拼施工的斜拉桥结构优化[J].中外公路,2019,39(6):53-59.
- [2] 刘凯,裴炳志,张门哲,等.混合梁斜拉桥钢-混结合段附近区域梁段刚度和承载能力的合理分布研究[J].中外公路,2019,39(6):66-72.
- [3] 陈瑞,田仲初,王祺顺.钢桁架连续弯梁桥体系转换研究[J].中外公路,2019,39(6):103-106.
- [4] 朱立山,才振山,蒋雨骏.洞庭湖大桥两跨连续钢桁架加劲梁合龙方案研究[J].中外公路,2019,39(5):118-122.
- [5] 铁木尔.长边跨高墩大跨连续刚构桥施工方案比较[J].中外公路,2019,39(5):127-131.
- [6] 石柱,项超群,上官兴,等.钢桁梁桥新型波形钢-RPC组合桥面板非线性有限元分析[J].中外公路,2019,39(5):86-92.
- [7] 周杜,刘武,石柱.悬索桥钢桁加劲梁架设施工关键技术研究[J].中外公路,2019,39(3):129-134.
- [8] 刘钊.浅谈桥梁工程中的钢箱梁顶推施工[J].建筑技术研究,2021,3(10):3-4.
- [9] 宋时春,李汉宇.公路桥梁顶推法施工技术研究[J].绿色环保建材,2016(10):98.
- [10] 鲁美,刘敏.公路钢箱梁顶推法施工技术及数值模拟分析[J].商品与质量,2021(17):370-371.