

基于顶推施工的连续钢箱梁桥设计及关键技术

陈勇

[上海市市政工程设计研究总院(集团)有限公司,上海市200092]

摘要:连续钢箱梁作为一种常用的桥梁结构形式,具有跨越能力强、施工周期快、景观效果好等特点。近年来随着桥梁施工方法及能力的发展,采用顶推施工的钢箱梁桥也越来越多。以扬州市扬子津路润扬河大桥为例,详细介绍了采用顶推施工的连续钢箱梁的结构设计及其关键技术,建立桥梁的有限元模型,对桥梁运营及施工阶段结构受力进行分析,并对设计合理性进行阐述,可为同类型桥梁设计及施工提供参考。

关键词:连续钢箱梁;顶推施工;结构设计;计算分析

中图分类号:U448.21+6

文献标志码:B

文章编号:1009-7716(2021)08-0129-04

0 引言

随着社会经济的快速发展,城市交通越来越繁忙,桥梁在跨越铁路、公路及重要河道施工时,要求尽量减小对桥下交通、河道通航行洪及堤防安全的影响。这一要求同时也促进了桥梁施工工艺及能力的快速发展,顶推法施工就在这种背景下逐渐发展起来并得到广泛应用。钢箱梁作为一种常用的结构形式,具有自重轻、强度高、跨越能力强的特点,可在工厂预制,运输到现场后拼装,利用其轻质高强的特点可以做到较大的悬挑长度,同时还可以借助导梁的作用,顶推跨径可以做到足够大,非常适合采用顶推施工。

钢箱梁桥采用顶推施工,对桥下构筑物几乎无影响,施工周期快,经济适用,安全可靠,对于无法搭设支架吊装的桥梁具有明显的优势,具备广阔的应用发展前景。对于采用顶推施工的连续钢箱梁结构,因为施工方法的不同,使得钢箱梁的结构设计也具有相应的特点,本文以扬州市扬子津路润扬河大桥45 m+50 m+45 m连续钢箱梁为例,详细介绍采用顶推施工的连续钢箱梁的结构设计及其关键技术,并对桥梁运营及施工阶段受力进行计算分析。

1 桥梁设计

1.1 总体布置

扬子津路润扬河大桥为扬子津路跨越润扬河的

重要节点工程,该路段为城市主干路兼一级公路,设计速度为60 km/h。润扬河现状河道宽度约70 m,为非通航河道,是区域内的主要泄洪通道,河道中心线与道路中心线斜交17°,桥梁采用斜交布置。河道两岸设置有堤顶路及防汛通道,根据水务部门及防洪要求,堤身范围内不允许设置桥墩,故主桥跨径布置为45 m+50 m+45 m,主墩位于河中,边跨跨越两岸堤防。桥梁立面布置见图1。

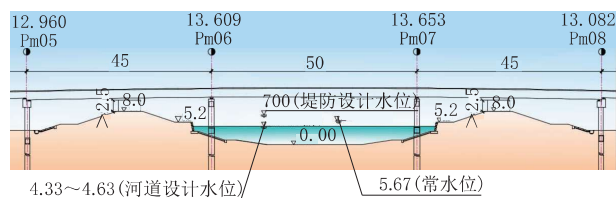


图1 桥梁立面图(单位:m)

桥梁标准段横断面为双向六车道,外侧设置非机动车道及人行道,桥梁全宽50 m,采用两幅桥布置,单幅桥梁结构宽23.25 m。根据道路总体设计,主桥东岸边跨桥面为变宽,单幅桥梁结构宽度为23.25~29.7 m。桥梁横向设置4个支座,支座位置均与腹板对齐。桥梁横断面见图2。

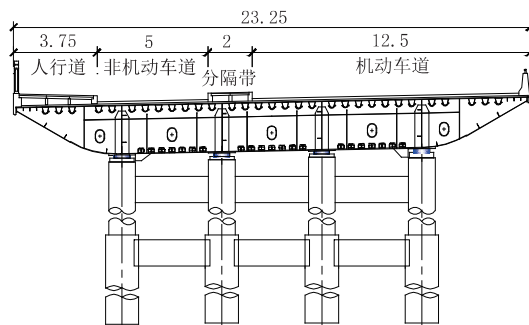


图2 单幅桥梁横断面图(正交)(单位:m)

收稿日期:2021-02-22

作者简介:陈勇(1987—),男,硕士,工程师,从事桥梁设计工作。

因润扬河为非通航河道,大型水上吊装设备无法进出,且河道堤防安全要求高以致不允许搭设临时支架及进出大型吊装机械设备,故上部结构主梁无法采用常规的吊装施工。通过实地考察及对比分析,借鉴类似工程的成功经验,最终拟采用整联顶推施工。

1.2 结构设计

主梁采用 45 m+50 m+45 m 三跨等高连续钢箱梁设计,梁高为 2.2 m,单幅钢箱梁标准段宽 23.05 m,采用单箱三室断面,外侧挑臂采用圆弧形底板封装。钢箱梁一般横断面见图 3。东岸边跨钢箱梁为变宽,为使顶推施工过程中顶推设备支撑位置与腹板对齐,箱室内 4 道腹板在平面上采用直线设计,即中间箱室宽度不变,在两侧变宽范围内增设腹板来实现结构变宽。横向隔板与纵向腹板均为斜交布置。腹板及箱室划分见图 4。

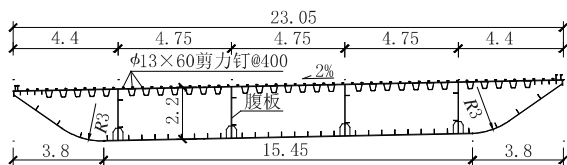


图3 一般横断面(单位:m)

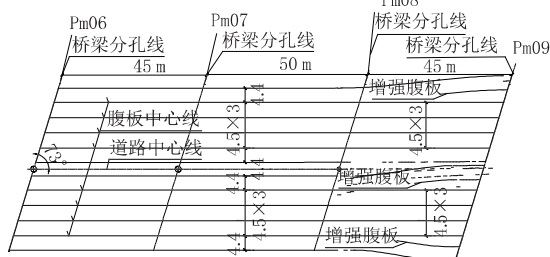


图4 腹板及箱室划分(单位:m)

钢箱梁顶板、底板、腹板根据不同位置的受力特点,采用变厚度设计,厚度参数见表1。顶板全部采用U肋,底板中支点处采用T肋,其余位置采用板肋。为减小桥面板因行车问题产生的疲劳破坏,桥面铺装采用8 cm厚混凝土+10 cm沥青混凝土,混凝土铺装和桥面板间设置剪力钉连接。

表1 钢箱梁板厚设计参数表

距梁端 距离/m	0~11	11~23	23~35	35~53	35~63	63~70
顶板 /mm	20	20	20	25	20	16
腹板 /mm	20	16	20	25	20	16
底板 /mm	20	20	25	40	25	20

纵向每隔 3 m 设置一道横隔板,横隔板分空腹式和实腹式两种间隔布置,空腹式横隔板厚 12 mm,

实腹式横隔板厚 14 mm。

因顶推施工时支座须在顶推就位后安装,主梁需设置临时支撑,且临时支撑位置与腹板不对应,通过支座横隔板来传力,需在支座横隔板上设置临时支座加劲。每个支座横隔板共设置 6 组支座加劲,每组支座加劲由 4 块 200 mm×16 mm×1 500 mm 加劲板组成。施工时可根据现场实际情况,灵活选择部分作为临时支座。支座横隔板断面见图 5。

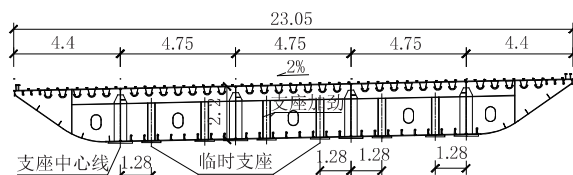


图5 支座横隔板断面(单位:m)

同时为解决顶推过程中底板及腹板下缘局部承压的问题,在腹板下缘设置补强短加劲,短加劲沿腹板纵向每隔 30 cm 设置一道,腹板两侧对称设置,短加劲尺寸为 200 mm×16 mm×500 mm,见图 6。

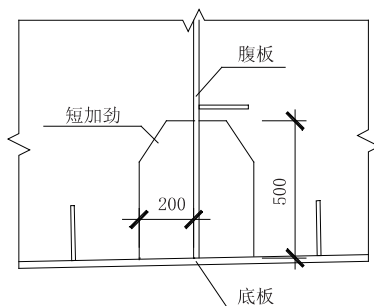


图6 腹板下缘补强短加劲(单位:mm)

2 运营阶段结构计算分析

本文选取北幅钢箱梁作为分析对象,采用 Midas Civil 建立三跨连续梁有限元模型(见图 7),主梁按照实际截面特性采用梁单元模拟,钢材采用 Q345qD,容重为 78.5 kN/m³,弹性模量为 2.06×10⁵ MPa。

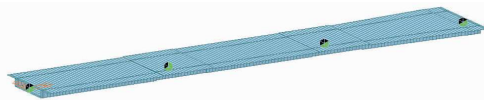


图7 钢箱梁有限元模型

2.1 强度分析

钢箱梁强度计算属于承载能力极限状态分析,主要考虑的荷载组合有恒载、汽车、人群、梯度温度、支座沉降等。钢箱梁计算应考虑剪力滞效应对顶底板有效宽度的影响,及受压板件局部稳定的折减。此外钢箱梁顶板计算还应考虑第一体系和第二体系叠加。荷载基本组合考虑折减后钢箱梁顶底板第一体系应力见图 8、图 9。



图8 顶板第一体系应力包络图(单位:MPa)

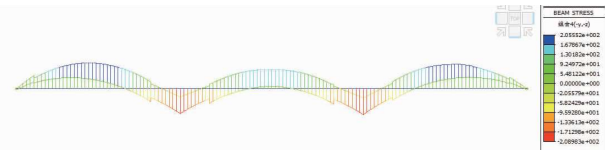


图9 底板第一体系应力包络图(单位:MPa)

钢箱梁顶板第二体系应力是桥面板在车轮荷载作用下,桥面板及加劲肋以横隔板为支撑产生的正应力,通过将桥面板及加劲肋简化为刚性支撑的连续梁来计算。考虑第一、二体系叠加后的应力见表2。

表2 基本组合钢箱梁应力表 单位:MPa				
部位	应力	第一体系	第二体系	合计
顶板	压应力	-161	-45	-206
	拉应力	210	25	235
腹板	剪应力	80.5	—	80.5
底板	压应力	-209	—	-209
	拉应力	206	—	206

根据以上计算分析,钢箱梁最大拉应力为235 MPa,出现在中支点顶板处,最大压应力为209 MPa,出现在中支点底板处,均满足要求。

2.2 挠度分析

钢箱梁相对于混凝土梁刚度小,对变形更加敏感,控制钢箱梁主梁挠度是钢箱梁设计的关键之一。根据公路钢桥规范的要求,在不计冲击的汽车荷载标准值作用下,连续梁竖向最大挠度不应超过L/500。通过有限元模型计算,主梁挠度值见图10。

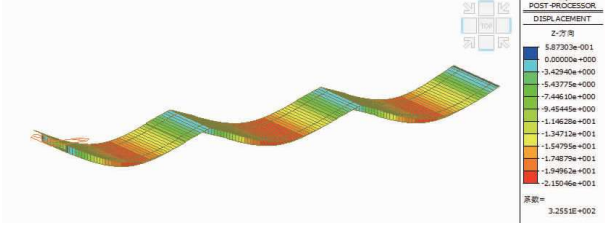


图10 汽车荷载主梁最大挠度(单位:mm)

汽车荷载作用下主梁最大挠度为21.5 mm,为跨径的1/2 325,挠度控制满足要求。

3 施工阶段结构分析

3.1 顶推法施工介绍

顶推法施工在桥梁上的应有已有数十年历史,目前工程上常用的顶推法有拖拉式顶推和步履式顶

推。近年来,随着智能顶推设备的发展,步履式顶推的应用越来越多,而拖拉式则逐渐被淘汰,本工程即采用步履式多点连续顶推施工。

步履式顶推系统主要由智能控制系统、液压油缸系统、机械系统三大部分组成,通过计算机程序控制千斤顶的顶升、纵向平移及横向纠偏(见图11)。顶推系统的顶推步骤是竖向千斤顶将钢梁顶升,纵向千斤顶再将钢梁向前移动,然后竖向千斤顶回落使钢梁落在临时垫块上,水平千斤顶后退回位,再循环反复将钢梁顶推到位,整个顶推是顶推系统自平衡的循环过程,理论上对临时墩不产生水平力。还可以通过横向千斤顶对钢梁进行横向纠偏,通过临时垫块的高度调节钢梁的高程。

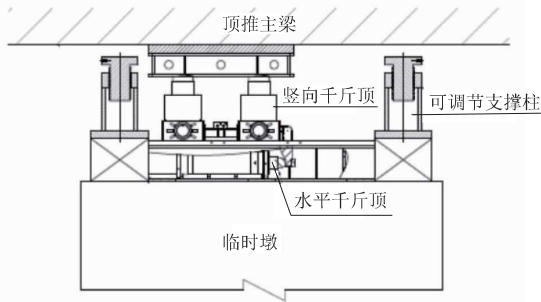


图11 步履式顶推装置示意图

3.2 顶推施工总体布置

本工程三跨钢箱梁单幅整体顶推,单幅桥顶推总重2 000 t,跨间不设临时墩,在永久墩顶设置步履式顶推装置。因东岸边跨为变宽构造,钢箱梁悬挑自重相对较大,采用由东向西单向顶推,东岸引桥范围作为拼装平台。因本工程钢箱梁及桥墩均为斜交布置,横向支撑反力存在差异,且钢箱梁较宽,为减小单个顶推装置反力,控制箱梁底板局部应力,横向采用4点顶推,即在每道腹板下设置一个顶推点。

顶推施工通常在主梁前端设置钢导梁,钢导梁线重度小于主梁,通过减小主梁的悬臂长度来减小主梁弯矩,以此达到较大的顶推跨径。钢导梁长度一般为顶推跨径的0.6~0.8倍,本工程取30 m,采用变高度设计,由4片工字钢及横向连接系组成(见图12、表3)。

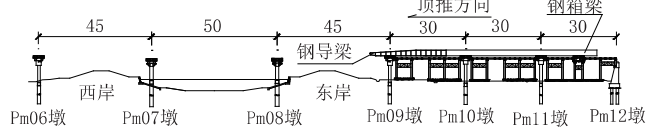


图12 顶推总体布置图(单位:m)

3.3 顶推过程计算分析

3.3.1 有限元模型

通过MIDAS建立施工阶段有限元模型,模拟钢

表 3 顶推关键工况表

工况	主要施工步骤
1	拼装钢箱梁 60 m,第一次顶推 23 m
2	拼装钢箱梁 23 m,顶推 22 m 使导梁至 8 号墩
3	导梁前端支撑在 8 号墩
4	拼装钢箱梁 45 m,顶推 50 m 使导梁至 7 号墩
5	导梁前端支撑在 7 号墩
6	拼装钢箱梁 12 m,顶推 45 m 使导梁至 6 号墩
7	导梁前端支撑在 6 号墩
8	继续顶推 30 m,钢箱梁顶推到位,拆除导梁

箱梁实际顶推过程,采用墩动梁不动的建模方法。因钢箱梁较宽,4 片腹板对应 4 片工字钢导梁,钢箱梁采用梁格单元模拟。顶推过程中钢箱梁每个断面正负弯矩交替发生,即每个断面均应按支点断面考虑剪力滞及局部受压稳定的影响,对模型中顶底板宽度进行折减,将钢箱梁简化成 4 片工字钢。临时支撑采用一般弹性连接模拟。有限元模型见图 13。

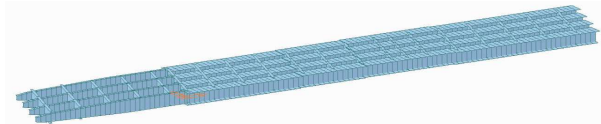


图 13 顶推有限元模型

3.3.2 整体受力分析

通过有限元计算,得出工况 1~工况 7 临时墩最大支反力、钢箱梁最大拉应力、压应力、及导梁最大变形数据,见表 4。

表 4 各工况计算结果

工况	支反力 Max/kN	拉应力 Max/MPa	压应力 Max/MPa	导梁挠度 Max/mm
1	1 044	33.7	-33.7	24
2	1 389	62.1	-83.2	265
3	1 090	29.3	-37.8	27
4	1 784	88.4	-118.6	396
5	1 502	45.9	-61.6	36
6	1 522	62.0	-83.2	228
7	1 593	43.6	-49.6	36

从计算结果可知,临时墩最大反力、钢箱梁最大拉应力、压应力及导梁前端最大挠度均发生在工况 4 时,该工况钢箱梁累计顶推 95 m,导梁及钢箱梁顶推至最大悬臂状态,即为顶推过程中最不利工况。最大支反力发生在 8 号墩顶临时支撑处,最大拉应力、压应力分别位于 8 号墩顶钢箱梁顶板、底板处,且应力大小满足要求。导梁前端最大竖向挠度为 396 mm,为使导梁前端顺利抵达前方临时支撑,导梁应设置牛腿。

3.3.3 局部应力分析

钢箱梁顶推过程中,受力最大的部位位于边跨跨中断面,也是整个钢箱梁中最为薄弱的断面。为进一步验算钢箱梁顶推的安全性,本文建立梁单元及板单元的全桥混合有限元模型,8 号墩顶临时支撑 6 m 范围内钢箱梁采用板单元模拟,分析最不利工况下钢箱梁局部应力。腹板下缘无补强加劲和设置补强加劲的钢箱梁有效应力见图 14、图 15。

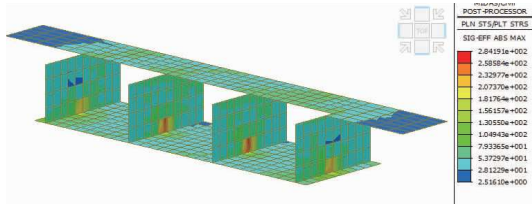


图 14 钢箱梁局部应力图(无补强加劲)(单位:MPa)

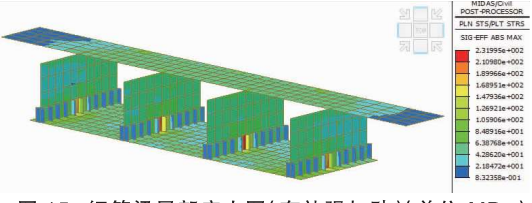


图 15 钢箱梁局部应力图(有补强加劲)(单位:MPa)

根据应力图可知,钢箱梁局部应力最大位于临时支撑处腹板下缘,腹板下缘无补强加劲时最大压应力为 284.2 MPa,腹板下缘设置补强加劲时最大压应力为 231.9 MPa,补强加劲对减小腹板下缘局部应力效果明显。钢箱梁顶板最大拉应力约 78 MPa,底板最大压应力为 150 MPa,大于纯梁格模型计算结果,板单元模型中存在应力集中。

钢箱梁处于最大悬臂状态时,临时支撑两侧板件变形存在较大差异,悬臂侧变形大,非悬臂侧变形小。这也导致钢箱梁底板接触临时支撑处存在应力集中,应特别注意对悬臂侧底板进行加强。同时作为斜交钢箱梁,变形横向不对称,悬臂方向平面为锐角侧变形大,钝角侧变形小,整个钢箱呈现出横向受扭状态,所以顶推过程中应特别注意钢箱梁的横向整体稳定性。最不利工况下 8 号墩临时支撑处钢箱梁变形见图 16。

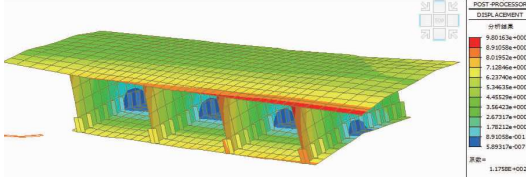


图 16 钢箱梁变形图(单位:mm)

4 结 语

钢箱梁桥顶推施工已逐渐成为桥梁常用施工方
(下转第 137 页)

中跨合龙需要重视合龙温度的影响。

如图13所示,在T5温度荷载作用下,边跨下挠、中跨上挠,T6温度荷载作用下主梁变形方向相反。T5、T6温度荷载作用下主梁变形最大值的绝对值分别为57.3 mm、29.8 mm。边跨悬臂变形与中跨悬臂变形都关于0#块顶部极对称。产生此现象的原因是:温度梯度作用撤销后,中跨悬臂的温度下变形变为0,而边跨温度下变形仅减小一部分且边跨产生温度次内力;中墩临时固结拆除后,旋转约束释放,此时边跨应力部分释放导致其梯度温度下变形增大,同时边跨结构的变形导致中跨悬臂产生与其等值反向的变形。

在T7、T8温度荷载作用下,主梁变形如图14所示。在T7温度荷载作用下,边、中跨变形最大值分别为8.3 mm、-48.8 mm;在T8温度荷载工况下,边中跨变形最大值分别为-4.5 mm、23.6 mm。结合图11、图12可知,T7、T8温度荷载作用下边跨挠度、应力值随距边跨端部的距离先增大后减小,呈现二次曲线线型,最大值位于边跨合龙段端部。中跨挠度、应力值随距0#块距离增大而增大,最大值位于中跨悬臂端部,而应力值在中跨合龙段出现骤然减小。

综合来看,存在温度梯度作用时进行合龙口锁定,温度效应对结构成桥后的应力、变形都影响较大,因此应选择截面温差较小时合龙。

4 结 论

(1)先边跨后中跨与先中跨后边跨合龙两种合龙方案下顶板、底板压应力差值不大,但先边跨后中跨合龙的应力变化更加平顺。因此,先边跨合龙方案更优。

(2)在边跨合龙时,梯度升降温对成桥阶段主梁应力无影响,但对主梁线形影响较大。而中跨合龙时,梯度升降温,对成桥主梁应力、变形均有较大影响。

(3)主梁线形、内力受合龙时梯度温度作用的影响较大,合龙前整体升降温对结构应力影响不大。由于温度作用滞后性的存在,合龙时应关注梁截面梯度温度,选择梁截面梯度温度较小时进行合龙施工。

参考文献:

- [1] 刘会球.大跨度单线铁路混凝土连续梁桥施工合龙方案研究[J].铁道科学与工程学报,2019,16(3):706-711.
- [2] 包仪军,丁明波,朱龙.合龙方案对多跨连续梁桥施工监控的影响分析[J].铁道标准设计,2016,60(3):82-86.
- [3] 李剑锋,季日臣.多跨预应力混凝土连续梁桥合龙顺序研究[J].铁道建筑,2018,58(2):42-44.
- [4] 郝东东,陈文.多跨连续梁桥合龙方案对比分析研究[J].四川建筑科学研究,2016,42(3):133-135.
- [5] 戴公连,王伟民,刘柯.基于变形的铁路混凝土连续梁合龙方案比较[J].桥梁建设,2014,44(4):96-101.
- [6] 刘东升,李金枝,冯仲仁.连续箱梁桥悬臂施工过程中温度梯度效应的空间分析[J].世界桥梁,2007(3):45-47+54.
- [7] 董旭,蔚龙祥,路军,等.预应力混凝土连续梁桥温度-挠度试验研究[J].公路工程,2016,41(3):198-202.
- [8] 张通.大跨梁桥悬臂施工期间温度效应监测与分析[J].兰州理工大学学报,2011,37(4):135-138.
- [9] 方志,汪剑.大跨预应力混凝土连续箱梁桥日照温差效应[J].中国公路学报,2007(1):62-67.
- [10] 袁磊,王石磊,张勇.混凝土铺装箱梁桥的合理温度梯度[J].铁道建筑,2015(4):1-5.
- [11] 曹立波,赵晓龙,刘姗姗.大跨度连续箱梁悬臂施工温度效应研究[J].施工技术,2011,40(19):98-101+110.
- [12] 肖勇刚,陈海兵,胡斯亮.混凝土连续箱梁施工中的温度效应分析[J].中外公路,2008(2):106-109.

~~~~~  
(上接第132页)

法,随着步履式顶推设备的发展,顶推吨位越来越大,控制系统越来越智能化,顶推施工的应用也将越来越广泛。采用顶推施工的钢箱梁桥设计除了满足运营阶段的安全性能外,关键还需对施工过程进行详细分析,进行特殊设计。

### 参考文献:

- [1] JTG D60—2015,公路桥涵通用设计规范[S].

- [2] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [3] 赵人达,张双洋.桥梁顶推法施工研究现状及发展趋势[J].中国公路学报,2016,29(2):32-43.
- [4] 谢福君,张家生.钢箱梁顶推参数影响及稳定性分析[J].铁道科学与工程学报,2019,16(6):1485-1492.
- [5] 谢祺.步履式顶推施工工艺对钢箱梁局部受力的分析研究[D].四川成都:西南交通大学,2015.
- [6] 陈卓.横向四滑道步履式顶推钢箱梁局部受力分析与同步控制研究[D].湖南长沙:长沙理工大学,2018.