

宁波新典桥拱梁整体步履式顶推施工关键技术

赵 炜

[同济大学建筑设计研究院(集团)有限公司, 上海市 200092]

摘 要: 宁波新典桥采用拱梁整体步履式顶推施工, 桥梁跨度为 213 m, 桥长 221.6 m, 最大顶推跨度为 70 m, 相对于采用同类施工方式的桥梁, 具有主梁较柔、顶推跨度较大、顶推重量较大、主梁有竖曲线且梁高有突变等特点与难点, 在同类施工方式中属于施工难度很大的一座桥梁。根据实际施工方案和步骤, 建立顶推全过程模型对施工过程中的主体结构进行验算。验算项包括主体结构的强度、支点处系梁腹板的局部稳定、支承位置加劲肋的验算、梁上支架位置的压柱稳定等。并结合计算结果对施工过程提出相关的建议和要求, 对同类型施工方式的桥梁具有一定的借鉴意义。

关键词: 下承式简支系杆拱桥; 步履式整体顶推; 施工模拟; 受力分析; 施工要点

中图分类号: U445

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2022)11-0152-05

0 引 言

随着我国钢结构加工与制造技术的发展, 钢结构桥梁建造数量不断增加。钢结构桥梁传统的施工方法一般为支架上架设和吊装施工, 但随着经济与基础设施的不断完善, 越来越多的桥梁需要跨越铁路和城市道路, 加上一些跨江桥梁的桥下通航压力较大, 也不适宜在江上过多设置支架, 这些桥梁施工的工作面严重受限, 此时采用顶推施工就是比较好的选择^[1-2]。

相对于传统的拖拉或者推动的顶推法, 步履式顶推法的多台千斤顶可以控制受力的均匀性, 更适用于顶推精度更高的项目。

对于拱桥的顶推施工, 一般可以分为两类。第一类为拱梁整体顶推施工, 第二类为先顶推梁后在梁上搭支架架设拱。新典桥采用的是第一类施工方案, 类似的实例包括福元路湘江大桥^[3]、杭州九堡大桥^[4]等。

1 工程概况

新典桥位于浙江省宁波市, 横跨奉化江, 是沟通海曙区和鄞州中心区的重要城市桥梁。

其中, 新典桥主桥采用下承式简支系杆拱桥, 钢箱系梁与拱肋固结的结构体系, 跨径为 213 m, 桥长 221.6 m。总体布置见图 1。

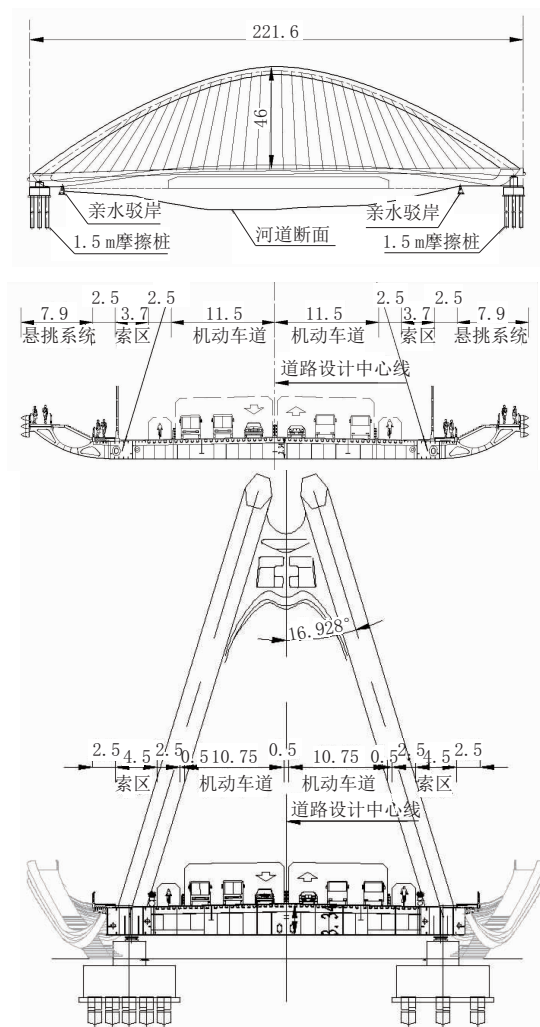


图 1 总体布置(单位:m)

主桥拱肋矢高 46 m, 矢跨比 1/4.63, 拱轴线为 1.7 次抛物线。两片拱肋向内倾斜 16.928°, 形成提篮状。

收稿日期: 2022-01-22

作者简介: 赵炜(1992—), 男, 硕士, 工程师, 从事桥梁设计工作。

系梁断面为四边箱型, 钢箱宽度为 2.5 m, 端横梁位置系梁高度为 3 m, 跨中钢箱高度为 2.0 m。钢箱板厚度由两侧的 30 mm 渐变到跨中的 16 mm。设置纵横向加劲肋板与横隔板。车行道面横坡为 2%。

系梁两侧悬挂着悬挑慢行系统, 包括 3 个组成部分, 分别是挑臂系统、副拱(装饰拱)、挑臂人行道系统。其中, 挑臂系统连接主梁和副拱, 是悬挑慢行系统主要受力构件。副拱为空间三维构造, 起到装饰整个桥梁的作用。挑臂人行道系统作为主桥功能区的一部分, 使得桥面上的行人与两岸的行人可以互通。悬挑慢行系统的断面图见图 2。整桥三维图见图 3。

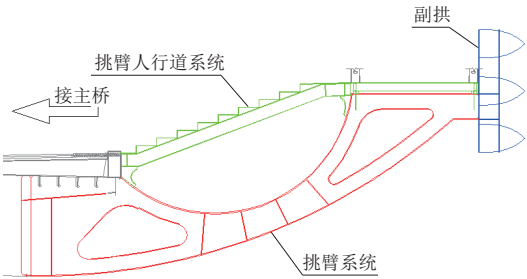


图 2 悬挑慢行系统横断系统图

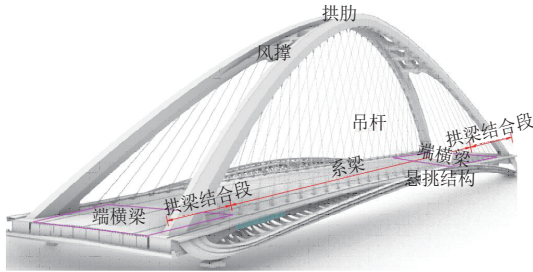


图 3 主桥三维图

2 施工方案概述

新典桥位于航道转弯处, 水流湍急, 船只在此处转向难以控制, 过往船只密集。传统的支架施工法需在江上搭设较多的临时墩和支架, 进行拱肋安装和桥面系施工, 对通航影响较大, 安全隐患较大, 通常在桥下无水或者通航要求不高的情况下采用。大节段浮吊施工时, 部分时段需要封航, 对施工期间的通航影响也较大。缆索扣挂法在处理体系转换时较为繁琐, 施工措施多, 也不太适用本项目。

考虑到本桥施工期间通航需求的限制因素, 适合的施工方式是顶推施工法。顶推施工法包括整体顶推法和先顶推钢梁后梁上架拱。整体顶推法因拱肋和钢梁组合受力, 可适用于施工期间较大孔径的通航孔(一般 40~50 m)。先顶推钢梁后梁上架拱方案因受限于系杆拱桥中钢梁本身的强度有限, 只适用于施工期间小孔径通航孔的情况(一般 30~40 m)。

若先顶推钢梁后梁上架拱方案应用于大孔径通航孔时(40~50 m), 需要对钢梁进行临时加强。临时措施造价过高, 且施工风险大。

为了尽量减小对奉化江航道的影响, 本桥最终采用拱梁整体顶推的施工方案。

2.1 总体施工方案概述

本项目主要施工步骤总结如下:

- (1) 施工进场, 三通一平; 施工桩基础、钢便桥、临时桩基、施工平台、承台桥墩施工。
- (2) 对岸上地基进行处理, 搭设钢梁支架。
- (3) 支架上安装钢系梁、拱脚节段和钢横梁。
- (4) 主梁上搭设临时安装支架, 分节段安装拱肋至合龙。
- (5) 主桥顶推施工。
- (6) 逐步拆除梁上临时安装支架并安装吊杆。
- (7) 拆除江中及岸上的顶推支墩。
- (8) 施工主桥悬挑慢行步道。
- (9) 张拉吊杆力至初步设计索力。
- (10) 施工桥面铺装等桥面系。
- (11) 张拉吊杆至成桥索力。
- (12) 桥梁照明及绿化施工。
- (13) 竣工通车。

2.2 顶推施工方案概述

主梁在工厂加工成板单元, 采用运梁车陆运至东岸(鄞州岸)拼装场, 地面拼装成节段, 采用龙门吊起吊节段至拼装支架上, 焊接成整体。

主梁拼装焊接并验收完成后, 主拱构件在地面拼装成节段, 主拱拼装利用主梁桥面上搭设主拱安装支架, 再采用龙门吊将主拱节段拼装到支架上并合龙。

拱桥在东岸拼装场拼装完成后, 采用多点步履式自平衡顶推系统将拱桥整体逐步顶推过江。

整体顶推施工的跨径布置为(35+36+70+5+26.5+40.5+42.5+47+47+46+47)m(千斤顶位置)。考虑到奉化江通航要求及防洪影响, 江中保留 70 m 宽的通航孔, 最大跨径东侧支墩上布置两套千斤顶, 总的顶推距离为 230 m。顶推施工总体布置见图 4, 单个支墩布置见图 5。

拱梁支架与系梁的节点构造见图 6。在系梁顶板上放置 3 拼的 H588 × 300 × 12 × 20 型钢(型钢腹板贴一块厚度为 12 mm 的钢板加厚), 顶部对准型钢腹板竖直放置 3 块 2 000 mm × 600 mm × 20 mm 的连接钢板并焊接(双面焊, 焊脚高度为 10 mm), 支架立

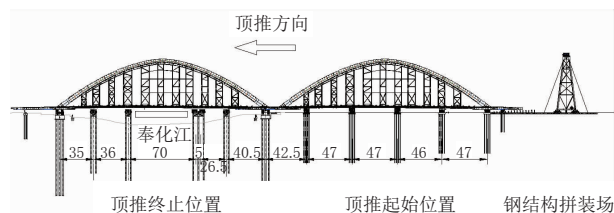


图4 顶推施工总体布置(单位:m)

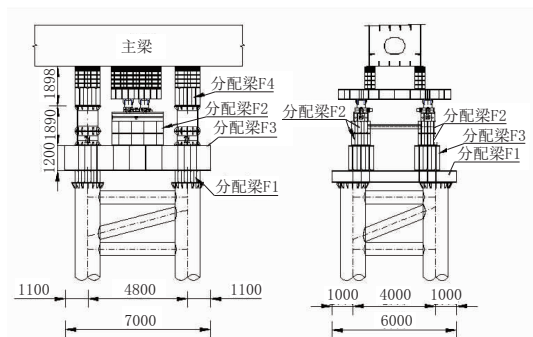


图5 顶推施工支墩布置(单位:cm)

柱底部开槽口,并将槽口对准连接板插入并熔透焊接。H型钢两侧封板对准系梁腹板并开单侧坡口熔透焊。

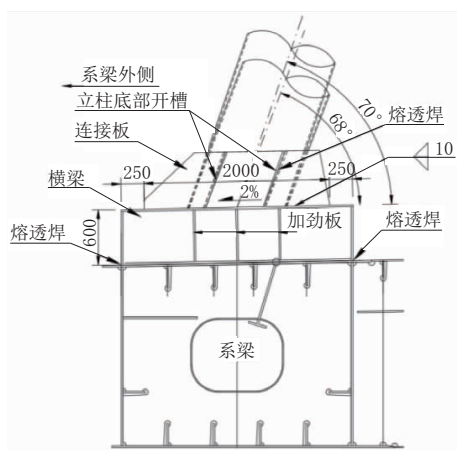


图6 梁上拱肋支架与梁连接节点(单位:mm)

拱梁支架与拱肋的节点构造见图7。立柱与拱肋采用栓接方式进行连接。柱头由上柱头、下柱头、嵌补段3个部分组成。上柱头预先与拱肋底部栓接在一起,下柱头与支架立柱焊接在一起。在上下柱头横隔板上,分别焊接用于拱肋安装阶段调梁的支承板。支撑板上根据调节拱肋的需要放置垫板,待拱肋调整到设计高程位置后,再焊接嵌补段钢板。

2.3 施工方案难点

主桥施工方案为拱梁整体步履式顶推施工,相对于一般的类似施工工法,本项目有以下特点与难点:

(1)由于主桥所跨越的奉化江通航要求较高,且与交叉口距离较近,受净空与纵坡的限制,永久结构高度受限,比如跨中系梁梁高仅为2 m,在同体量同

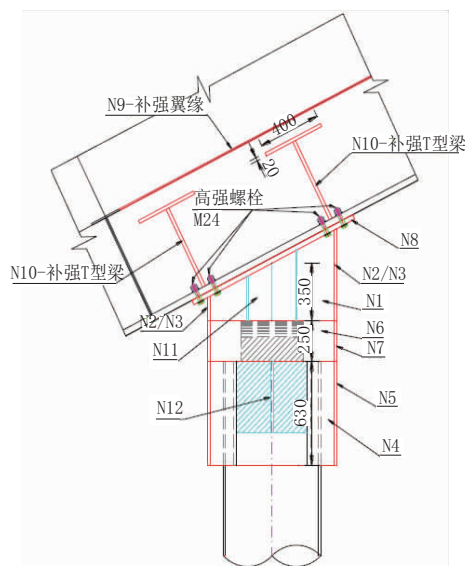


图7 梁上拱肋支架与梁连接节点

类型施工中属于主梁较柔的情况。

(2)主桥位于奉化江大斜交位置,为保证施工期通航安全,顶推施工时在江中保留70 m宽的通航孔,导致顶推跨度较大。

(3)为保证顶推结构的整体刚度和顶推跨度要求,除了永久结构外,顶推临时结构非常密集,梁上支架间距约为9~12 m。另外,还设置有长45 m的前导梁和长25 m的后导梁,大大增加了顶推重量,顶推总重接近10 000 t。

(4)由于跨中主梁高度受限,导致主梁设计时不得已使用了梁高突变的形式,而且部分主梁位于竖曲线上,导致顶推施工时需不断调整顶推高度。

3 模型建立与计算理论^[5]

3.1 顶推施工模型建立

采用梁单元模型来模拟整桥顶推结构,共9 246个节点和11 420个单元,如图8所示。

其中,永久结构包括拱肋(含风撑)、系梁、拱梁结合段、端横梁(含牛腿)、正交异性桥面板、跨中约63 m范围的大挑臂。

临时结构包括拱肋支架和导梁,其中前导梁长度为45 m,后导梁长度为25 m,导梁梁高从根部的3 m渐变至端头的2 m;梁上支架每侧拱肋设置11组,每组由两根直径600~700 mm的钢管组成,每组的纵横梁都设置有横向联系保证支架钢管的整体稳定。

施工过程按照1 m一个施工阶段的精度模拟,共230个施工阶段。每个施工阶段支点的基础刚度根据桩长、钢管的长度和截面尺寸进行计算。



图 8 整体顶推模型

3.2 验算标准

顶推施工中除了需要关注主体结构的强度外, 还需要重点关注支点处系梁腹板的局部稳定、支承位置加劲肋的验算、梁上支架位置的压柱稳定等。

从计算结果来看, 顶推施工中拱肋内力包络图与成桥阶段的内力接近, 不控制设计, 顶推施工中受力危险构件为系梁。

- (1)系梁的强度验算主要包括顶底板的正应力、腹板的剪应力和折算应力, 验算标准参考 JTG D64—2015^[6]。
- (2)系梁腹板的局部稳定参考 GB 50017—2017^[7] 中的 6.3.5 条计算。
- (3)支承位置加劲的强度参考 JTG D64—2015 中的 5.3.4 条计算。
- (4)梁上支架位置的压柱稳定验算, 将支点与梁上支架之间的系梁梁段看成两个受压“短柱”(见图 9)。通过 JTG D64—2015 附录 A 将其看成轴心受力构件来验算“短柱”的整体稳定。

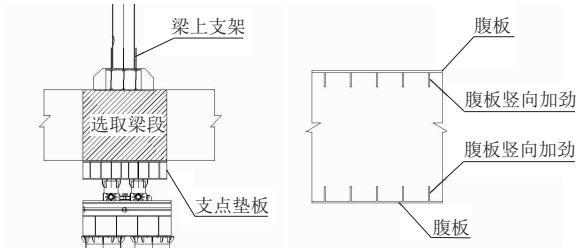


图 9 受压短柱示意图

4 计算结果

4.1 总体计算结果

顶推施工阶段, 永久结构主要受力结构为拱肋和系梁。拱和梁的主要受力情况见图 10~ 图 13。

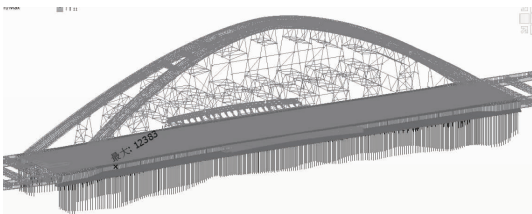


图 10 反力包络图(单位: kN)

4.2 强度验算

从上述计算结果可以看出, 整个顶推施工期间, 拱肋的受力较小, 最大正应力只有 74 MPa, 而系梁

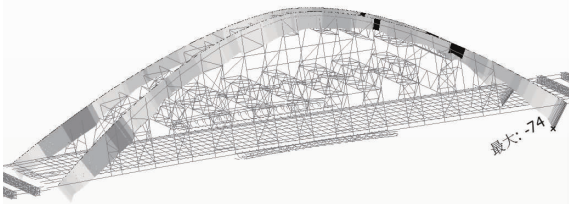
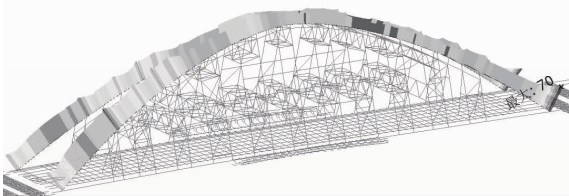


图 11 拱肋正应力包络图(单位: MPa)

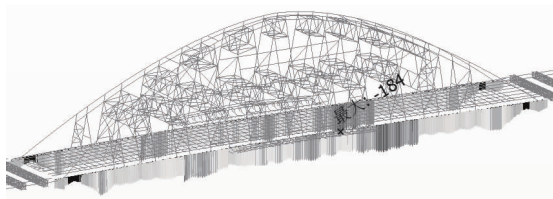
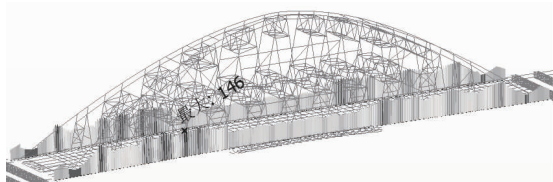


图 12 系梁正应力包络图(单位: MPa)

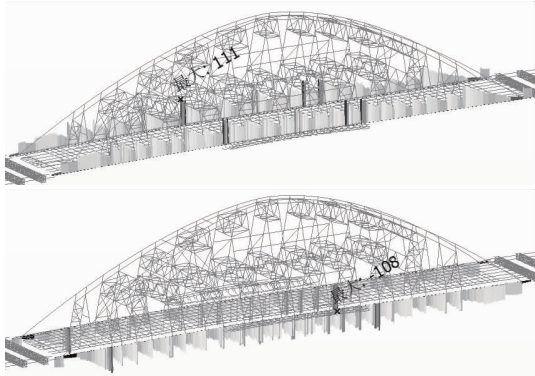


图 13 系梁剪应力包络图(单位: MPa)

的应力较大, 最大正应力为 184 MPa, 最大剪应力为 111 MPa, 最大折算应力为 255 MPa。计算结果及规范允许值见表 1。

表 1 强度验算		单位: MPa		
构件	拱肋	系梁		
验算项	正应力	正应力	剪应力	折算应力
最大应力绝对值	74	184	111	255
规范允许值	270	270	150	297

4.3 腹板局部稳定

系梁腹板的局部稳定参考 GB 50017—2017 中的 6.3.5 条计算。计算结果根据腹板厚度来区分(见表 2)。

从表 2 计算结果可知, 系梁 16 mm 梁段部分工

表 2 腹板局部稳定验算 单位:MPa

腹板厚度		30 mm	24 mm	20 mm	16 mm
腹板稳定性系数	上区格	0.32	0.64	0.72	0.82
	下区格	0.62	0.91	0.95	1.18
规范限值		1	1	1	1

况计算结果大于规范限值,但由于系梁腹板横肋间距为 0.5 m,系梁内部构造见图 14。GB 50017—2017 中无法考虑腹板加劲这么密的情况。实际上这种情况下,腹板已经不存在稳定性问题,只可能强度破坏。由于腹板剪应力较大,施工阶段有必要采取一定的措施降低剪应力。

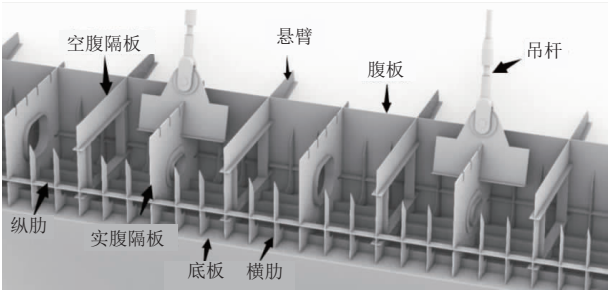


图 14 系梁内部构造

4.4 支座加劲验算

顶推施工中,可将腹板横肋近似看成支座加劲肋,因此需要验算其是否满足 JTG D64—2015 中的 5.3.4 条。其中,为了提高局部受力性能,将板厚 16~24 mm 的横肋加密至 0.25 m,计算结果见表 3。计算结果显示,支座位置局部承压应力和等效压柱应力都满足规范要求。

表 3 支座加劲验算表 单位:MPa

腹板厚度		30 mm	24 mm	20 mm	16 mm
局部承压应力	计算值	73	65	75	86
	规范允许值	355	355	355	355
等效压柱应力	计算值	167	132	155	182
	规范允许值	270	270	270	275

4.5 压柱稳定验算

当系梁上支架节点随着顶推施工移动到千斤顶正上方时,可将这部分系梁梁段看成两个受压“短柱”,通过 JTG D64—2015 中附录 A 将其看成轴心受力构件来验算“短柱”的整体稳定。计算结果见表 4。计算结果显示,短柱稳定都满足轴压构件的整体稳定要求。

5 施工要点

从计算结果可以看出,本桥系梁相对较弱,需要

表 4 短柱稳定验算表 单位:MPa

腹板厚度		30 mm	24 mm	20 mm	16 mm
压柱稳定等效应力	计算值	198	212	205	209
	规范允许值	270	270	270	275

保证其在施工过程中的安全性,需要对施工过程及措施作以下要求:

(1)保证千斤顶和垫块与梁底的接触长度,保证顶推和落梁时系梁梁底的受力均匀。在实际施工过程中需要采取控制措施,如加强落梁抄垫间隙的控制,严格操作过程来保证系梁两侧腹板反力基本相等,顶推及落梁时需要保持梁体平稳。

(2)在临时墩最大跨处临时墩增设一套千斤顶及垫块,减小梁在最大跨处局部受力。

(3)在理论计算应力较大的部位,对系梁进行必要的补强,如增加钢板厚度及局部受力加劲的密度。

(4)根据系梁各部位钢板厚度,主动控制千斤顶力的大小和落梁垫块的相对高度,以调节系梁各部位受力大小。

(5)在顶推过程中,建议尽量减少临时结构的自重,不要有较大的临时荷载。

6 结 语

宁波新典桥拱梁整体步履式顶推施工在同类施工方式中属于施工难度很大的一座桥梁。本文根据实际施工方案和步骤,建立顶推全过程模型对施工过程中的主体结构进行验算,并结合计算结果对施工过程提出相关的建议和要求,对同类型施工方式的桥梁具有一定的借鉴意义。

参考文献:

[1] 杨吉.大跨径变截面钢箱梁桥步履式顶推技术研究[D].重庆:重庆交通大学,2020.
[2] 邱小航.顶推施工的钢-混组合梁桥计算方法及受力特性研究[D].成都:西南交通大学,2020.
[3] 周仁忠,杨炎华,卢勇.福元路湘江大桥整体顶推施工技术研究[C]//中国公路学会桥梁和结构工程分会 2013 年全国桥梁学术会议论文集,2013:537-543.
[4] 常晨曦,薛华.杭州九堡大桥钢拱梁整体顶推技术[J].施工技术,2012,41(23):32-33,46.
[5] 董国桢,郭辉.鹅公岩城轨专用桥边跨钢箱梁顶推施工整体受力分析[J].铁道建筑,2016(9):26-30.
[6] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
[7] GB 50017—2017,钢结构设计标准[S].