

DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.2021.09.019

带外伸横梁的钢箱梁桥设计实践

肖春¹, 李旭彪², 王文建², 马超³

(1.中恒工程设计院有限公司, 四川 成都 610017; 2.中国市政工程西北设计研究院有限公司, 甘肃 兰州 730030;

3.成都空港城市发展集团有限公司, 四川 成都 610200)

摘要:当高架桥受桥下河道、道路、地铁、地下管线等限制时,采用外伸横梁是一种有效的解决办法。结合凤凰山高架桥左主线第6联 4×28.9 m带外伸横梁的钢箱梁桥,介绍了凤凰山高架桥的设计、计算及施工,并探讨了横梁高度的取值、施工过程中横梁的稳定措施,可为国内外类似桥梁的设计提供参考。

关键词:高架桥;钢箱梁;外伸横梁;Midas Civil

中图分类号: U442.5

文献标志码: B

文章编号: 1009-7716(2021)09-0067-04

0 引言

随着社会经济的快速发展,城市高架桥以其占地少、受周边交通干扰小等优点,对缓解城市交通压力起了很大作用,已成为现代交通体系中的重要一环。城市高架桥的总体布置不仅要考虑高架桥自身的需求,还需兼顾桥下道路净空及整体景观要求,当高架桥中心线与桥下道路的交角较小,或桥墩的布设受河道、地铁、地下管线等限制时,采用外伸横梁是一种有效办法。

带外伸横梁的连续梁桥在国内外已有应用案例,尚延刚^[1]研究了武汉市唐家墩立交桥A匝道AL3联连续梁,采用大跨带外伸钢横梁同时跨越二环路、姑嫂树主线高架及唐家墩地铁站的设计思路,解决了因空间限制无法布置桥墩的难题。程伟^[2]结合上海松江有轨电车T2线工程,研究了具有外扩横梁的钢箱梁总体设计,分析了外扩横梁与主梁交叉区域的受力,探讨了该联钢箱梁的施工分段及吊装方案。罗来洋^[3]结合惠州金恺大道A匝道 4×30 m带外伸横梁的预应力混凝土连续箱梁,对该桥纵向主梁的内力分布、结构设计、支承反力等进行了研究,为该桥的设计提供了一些有益的建议。

1 桥梁设计

1.1 桥梁总体布置

成都市凤凰山高架桥左主线桥为既有北星高架桥与凤凰山高架桥之间的连接通道,其起点采用拓

宽桥接北星高架桥,终点接凤凰山高架桥主线,全长902.8 m,标准宽度9 m。其中第6联上跨北星高架桥与沙河排洪渠,其平面位于 $R=254.8$ m的圆曲线及缓和曲线上,纵断面位于1.054%的纵坡及竖曲线上为本工程的控制性节点^[4]。本节点处的建设条件为:

(1)桥下的沙河排洪渠与左主线桥夹角为 23.6° ,河道的净宽约14.5 m,考虑到泄洪需求,河道管理部门要求不得在河道中布置桥墩。

(2)北星高架桥与左主线桥夹角为 23.1° ,其左、右幅桥布置于沙河排洪渠的两侧,左、右幅桥之间的净距为3.5 m,单幅桥宽13.5 m,该桥于2007年建成通车。

经综合考虑,本联采用跨径布置为 4×28.9 m的连续钢箱梁,在Z16#~Z18#桥墩处采用外伸式横梁,总体布置如图1、图2、图3所示。

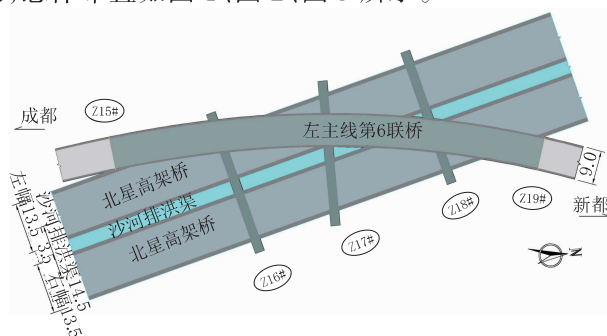


图1 上跨节点平面示意图(单位:m)

1.2 技术标准

- (1)道路等级:城市快速路。
- (2)设计车速:60 km/h。
- (3)桥梁设计安全等级:一级。
- (4)设计荷载:城-A级。
- (5)抗震等级:地震基本烈度为7度。

收稿日期: 2021-03-07

作者简介: 肖春(1982—),男,硕士,高级工程师,从事桥梁设计及技术管理工作。

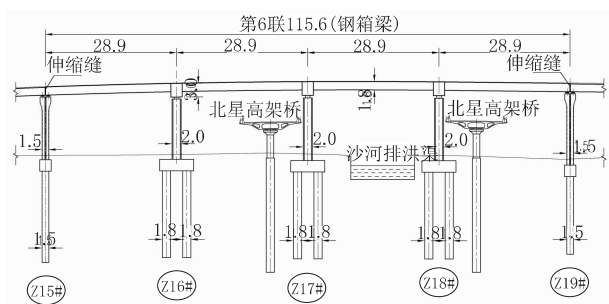


图2 左主线第6联桥立面图(单位:m)

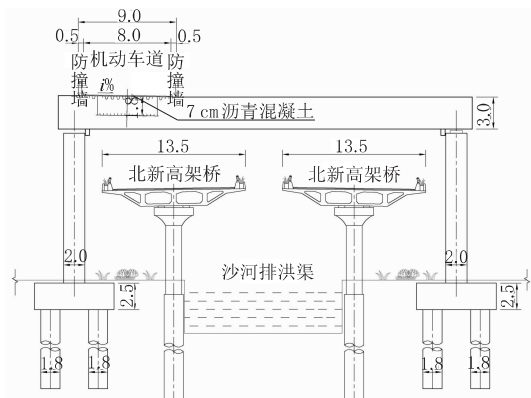


图3 典型横断面图(单位:m)

(6)桥下净空高度大于等于5.0 m。

1.3 下部结构布置

Z16#、Z17#、Z18# 中支墩均采用双柱墩,墩高分别为13.2 m、13.7 m、13.7 m,采用2.0×2.0 m的矩形截面,截面边缘采用半径 $R=0.2$ m的圆弧倒角。基础均采用承台+桩基础,桩径 $D=1.8$ m。

Z15#、Z19# 分联墩均采用T型桥墩,墩高分别为13.7 m、15.6 m,墩柱采用2.0×1.5 m的矩形截面。基础均采用承台+桩基础,桩径 $D=1.5$ m(见图4)。

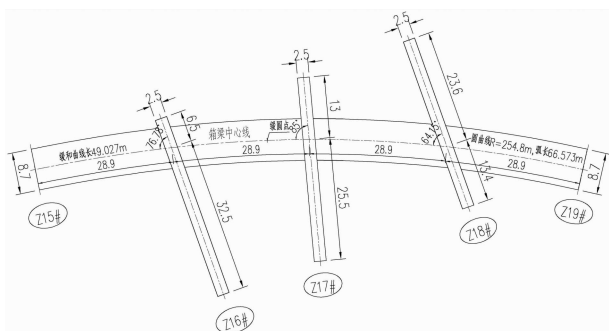


图4 钢箱梁平面构造图(单位:m)

1.4 钢主梁构造

钢主梁的跨径布置为4×28.9 m,采用单箱双室断面,顶板宽8.7 m,底板宽5.5 m,梁高1.82 m。主梁顶板一般段厚16 mm,顶板加厚段厚40 mm,底板厚20 mm,腹板厚16 mm。

主梁顶板采用U肋、板肋进行纵向加劲,底板、腹板采用板式加劲肋进行纵向加劲。主梁内普通横

隔板的标准间距为3 m,在普通横隔板之间设次隔板,在支座位置处设支座横隔板。普通横隔板及次隔板的板厚均为12 mm,支座横隔板的板厚为20 mm。钢主梁采用Q345C钢材(见图5)。

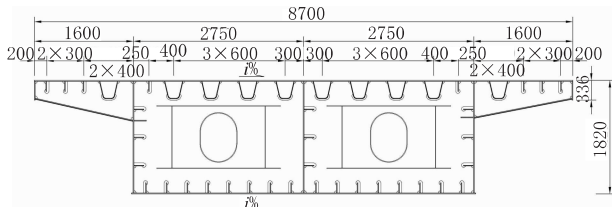


图5 箱主梁标准横断面图(单位:mm)

1.5 钢横梁构造

横梁采用单箱单室箱梁,横梁宽2.5 m,Z16#横梁高为3.0~3.315 m,Z17#横梁高为3.0~3.344 m,Z18#横梁高为3.0~3.386 m。横梁的顶、底板厚均为40 mm,腹板厚20 mm。

横梁顶板采用倒T肋加劲肋,底板及腹板均采用板式加劲肋。横梁节间内普通横隔板间距为3 m,在普通横隔板之间设次隔板,支座位置设支座横隔板。普通横隔板及次隔板的板厚均为16 mm,支座横隔板板厚为30 mm。横梁采用Q345C钢材(见图6)。

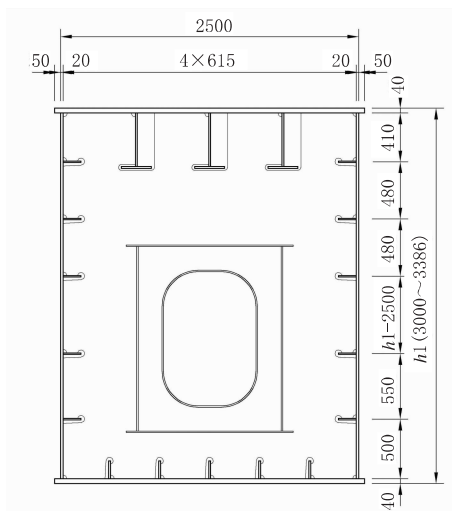


图6 横梁标准横断面图(单位:mm)

1.6 主梁及横梁相交段构造

主梁与横梁相交段采用如下构造:

(1)主梁顶板及顶板纵向加劲肋:横梁、主梁相交处共用顶板;为保证主梁顶板的抗疲劳强度^[5-6],采用在横梁腹板、横梁顶板倒T肋上开孔的方式,以保证主梁顶板的纵向加劲肋能连续通过。

(2)主梁腹板及腹板加劲肋、主梁底板及底板加劲肋:均在横梁腹板处断开,并与横梁腹板焊接;主梁腹板加劲肋由于与横梁腹板加劲肋有较多冲突,在横梁内不设置。

1.7 支承体系

在 Z15#、Z19# 桥墩墩顶均采用双支座, 支座间的横桥向间距为 4.1 m; Z16#—Z18# 桥墩均采用双支座, 支座横桥向距横梁端部 1.5 m。为适应横梁的较大转角, 各支座均采用 JQZ(II) 球型支座, 支座布置如图 7 所示。

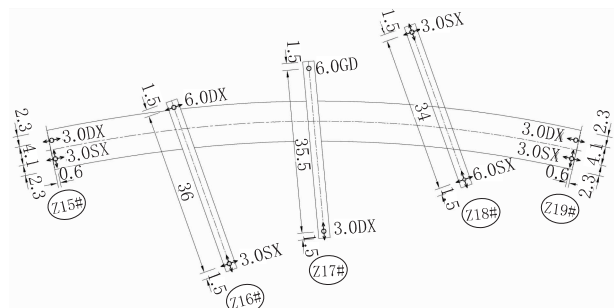


图 7 支座平面布置图(单位:m)

1.8 边跨配重

为防止支座出现负反力, 在钢主梁梁端 6.26 m 长度范围内的箱室底部浇筑 C25 素混凝土进行压重, 压重混凝土 Z15# 桥墩侧高度为 60 cm、Z19# 桥墩侧高度为 45 cm。

1.9 预拱度设置

预拱度采用结构自重与 1/2 活载之和, 根据计算结果, 在 Z16#、Z17#、Z18# 横梁的跨中分别设 15 mm、22 mm、23 mm 的向上预拱度, 第 1—4 跨主梁跨中分别设置 10 mm、17 mm、26 mm、19 mm 的向上预拱度。

1.10 钢梁的连接

钢梁在工厂、工地均采用焊接连接。

1.11 桥面铺装构造

钢桥面铺装总厚度 7 cm, 由上至下分别为 3.5 cm SMA-10+3.5 cm GA-10(浇筑式沥青混凝土)+防水粘结层。

2 结构分析

2.1 分析模型

2.1.1 有限元模型

带外伸横梁的钢箱梁桥由于空间效应明显, 需采用空间分析模型进行精细化分析以保证结构安全。采用 Midas Civil 有限元程序进行结构整体的静力分析, 桥墩、主梁、横梁均采用梁单元模拟。共划分为 330 个节点, 309 个单元, 如图 8 所示。

2.1.2 荷载

(1)普通钢筋混凝土构件重度为 25 kN/m^3 , 沥青混凝土重度为 24 kN/m^3 , 钢结构重度为 78.5 kN/m^3 。

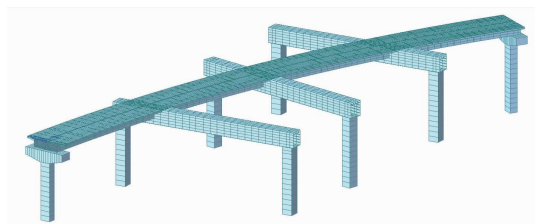


图 8 整体有限元分析模型

(2)支座不均匀沉降: Z15#、Z19# 墩的整体不均匀沉降采用 0.01 m, Z16#、Z17#、Z18# 墩 2 个墩柱各自的不均匀沉降均采用 0.01 m。

(3)整体升降温: 成都位于温热地区, 钢桥的最高有效温度标准值为 46°C , 最低有效温度标准值为 -9°C , 合拢温度在 $15 \pm 3^\circ\text{C}$ 之间, 因此合拢后结构的整体升温采用 34°C , 整体降温采用 27°C 。

(4)钢桥面竖向梯度温度效应: 参照英国规范 BS-5400^[7] 的规定来计算钢桥面竖向温度梯度的影响, 钢箱梁桥面铺装厚度为 70 mm, 梯度温度的取值为: $T_1=24^\circ\text{C}$, $T_2=14^\circ\text{C}$, $T_3=8^\circ\text{C}$, $T_4=4^\circ\text{C}$, $T_1' = 6^\circ\text{C}$ 。

(5)冲击系数: 按《公桥规》[8]第 4.3.2 条取值。

2.2 分析结果

2.2.1 静力分析结果

根据模型计算结果提取截面的应力、挠度、空间变形特征, 得出承载能力极限状态主梁上下缘最大正应力包络图(见图 9)、汽车活载作用下的竖向位移示意图(见图 10)。

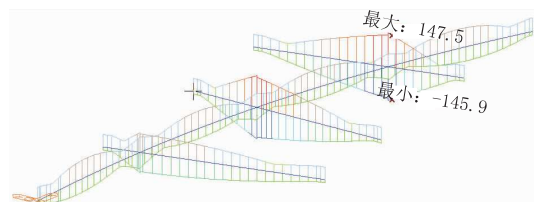


图 9 承载能力极限状态主梁最大正应力包络图(单位:MPa)

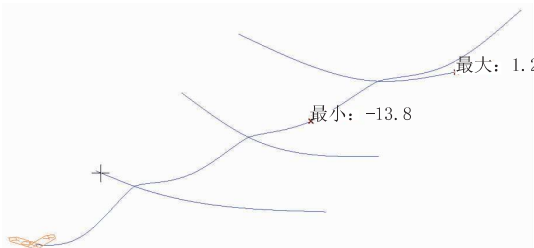


图 10 汽车活载作用下主梁位移包络图(单位:mm)

由计算结果可知, 在承载能力极限状态下, 钢梁的最大正压应力、最大正拉应力均位于 Z18# 横梁与主梁相交处, 压应力设计值为 $1.1 \times 145.9 \approx 160.5 \text{ MPa} < 270 \text{ MPa}$, 拉应力设计值为 $1.1 \times 147.5 \approx 162.3 \text{ MPa} < 270 \text{ MPa}$, 满足规范^[6]要求。主梁最大挠度为 13.8 mm, 位于第 3 跨跨中, 挠跨比为

1/209 4 < 1/500, 满足规范^[6]要求。

2.2.2 整体稳定性验算

采用特征值屈曲理论对结构进行稳定性分析。在恒载工况下,第1类整体稳定安全系数为94.8,表明本结构具有很好的整体稳定性。

2.3 不同横梁高度对结构的影响分析

Z16#、Z17#、Z18# 钢横梁的跨径分别为 36 m、35.5 m、34 m, 各横梁的跨径均比主梁标准跨径 28.9 m 大, 横桥向体系为第一受力体系, 纵桥向受力体系为第二体系, 横梁的竖向刚度对本联钢箱梁的整体刚度影响较大。为得到较合理的横梁刚度, 对 2.0 m、3.0 m、4.0 m 高横梁进行比选, 如表 1 所示。

表 1 不同横梁高度应力及挠度验算表

横梁高度 /m	承载能力极限状态应力			竖向挠度		
	应力计值 $\gamma_0 S_d$ /MPa	钢材强度 设计值 f_d /MPa	是否 满足	活载最大 挠度 /mm	挠度容 许值 /mm	是否 满足
2.0	356.6	270	否	24.3	57.8	是
3.0	162.3	270	是	13.8	57.8	是
4.0	117.2	270	是	10.7	57.8	是

从表 1 可看出, 横梁高度为 2.0 m 时的应力设计值为 356.6 MPa > 270 MPa, 不满足规范要求^[7]; 横梁高度为 3.0 m、4.0 m 时, 结构的应力、挠度均满足要求, 结合工程造价、桥下景观等因素综合考虑, 横梁高度采用 3.0 m。

3 安装方案及使用效果

3.1 主要施工步骤

主要施工步骤为如下:

(1) 完成桥墩施工及支座安装, 工厂同时预制钢横梁及钢主梁。

(2) Z16#、Z17#、Z18# 横梁依次吊装就位, 并临时固定。

(3) 第 1 跨主梁吊装, 并完成主梁与横梁之间的焊接。

(4) 依次吊装第 2、3、4 跨主梁, 并完成主梁与横梁之间的焊接。

(5) 主梁梁端的压重混凝土施工。

(6) Z16#、Z17#、Z18# 墩梁临时固结解除。

(7) 桥面系施工。

3.2 钢梁安装方案

综合考虑钢梁的制造、运输、吊装等控制条件, 本钢梁共划分为 11 个吊装节段, 采用 650 t 履带式

起重机进行吊装。

Z16#、Z17#、Z18# 钢横梁均采用 1 个吊装节段, 各节段的宽度为 6.5 m, 高度为 3.4 m, 最大长度为 39 m, 吊重分别为 175 t、179 t、173 t。

第 1—4 跨钢主梁在横桥向均划分为 2 个吊装节段, 各节段的宽度为 4.6 m, 高度为 1.82 m, 最大长度为 27.3 m, 最大吊重为 68 t。考虑构件的就位空间, 各跨钢主梁的吊装顺序为: A1→A2→B2→B1→C1→C2→D2→D1。

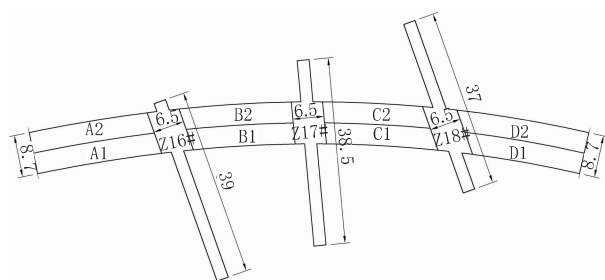


图 11 钢梁安装节段划分图 (单位: m)

3.3 施工期间横梁临时固定措施

成桥状态下, Z16#、Z17#、Z18# 等横梁均设置 2 个永久支座, 见本文第 1.7 节。Z16#、Z17#、Z18# 等横梁吊装就位后, 各横梁的受力体系为简支梁, 横梁范围内的 2 个永久支座所提供的约束存在 dx、dy 方向的平动及绕 rx 侧倾的风险, 需在各墩墩顶加焊与横梁之间的固结钢板作为临时约束, 待钢主梁、钢横梁焊接形成整体后方可解除该临时约束。

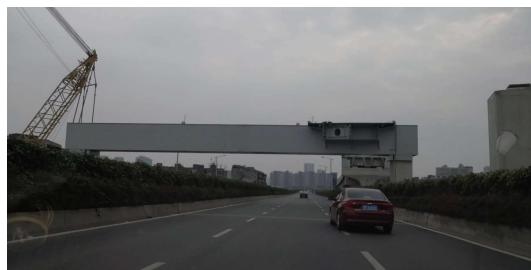


图 12 Z16# 桥墩吊装完成后照片

3.4 使用效果

左主线第 6 联钢梁于 2018 年 12 月安装完毕, 经过 3 年多的通车运营, 使用效果良好。

4 结 语

本文针对 4 × 28.9 m 带外伸横梁的钢箱梁桥进行了设计, 结论如下:

(1) 城市桥梁受周边条件限制往往结构复杂, 采用带外伸横梁的钢箱梁桥是一种可行的解决方案。

(2) 带外伸横梁的钢箱梁桥空间效应明显, 需采用空间分析模型进行精细化分析, 并根据分析结果

(下转第 79 页)

台身加侧墙和基础为 $2\,376\text{ m}^3$ (最新公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范中,耐久度要求台身混凝土设计 100 a,最少需要用到 C30 混凝土^[2]),根据现有水泥价格,一方 C30 混凝土大约需要 300 元,两个桥台造价大约需要 80 万元(包括台帽背墙)。挖土石方和台背回填透水性材料大约 10 万元。支架等杂项工程按 10 万元计。上部结构采用 30 m 的 T 梁,一片约 10 万,一跨包括桥面铺装大约需要 50 万元,3 跨 150 万元。

选择 $4 \times 25\text{ m}$ 桥跨方案时,桥台正好可以采用埋入式桥台,桩基深度 20 m 即可到达中风化岩层中,埋入式桥台造价大约需要 40 万元,上部结构 25 m 的 T 梁约 8 万元一片,一跨包括桥面铺装大约需要 40 万元,4 跨 160 万元。

根据以上经济对比分析,显然在桥跨长度增加并不多时候,能够避免采用高重力式桥台,更为合适。

在选择埋入式桥台时,应注意以下几点:

(1)确保桩柱式桥台埋入的土层为原状土,未经过长期稳定的人工填土地面线不可作为埋入式桥台的起算点。

(2)埋入式桥台的前墙放坡应做好贴坡防护和排水,避免傍山桥梁受山间水流影响造成桥台前的放坡土流失,桩基裸露。

(3)做好前期地质钻探,避免桩基布置在孤石或溶洞上。

2.3 桥墩的选择

在山区建设桥梁,往往会跨越深沟,有时中小桥在最低点处距桥面设计高程可能超过 50 m,在山区公路桥梁设计上,圆柱式排架墩和矩形空心墩较为常见,中桥主要以圆柱式排架墩为主,高度在 25 m 以上往往采用墩梁固结形式,这样可以最大限度发挥桥墩柔韧性的特点,使整个桥墩形成摆动支座,提高了整个桥梁的整体性。

3 结 语

在山区中小桥设计上,最需要的是因地制宜,没有固定结构形式,不可照搬套用。本文总结了多年设计经验,通过桥梁选型、上下部结构选型并且进行经济分析,结合实例进行讲解。提出了上部结构设计在山区宜为矮 T,下部结构可以选择 U 型桥台和埋入式桩基桥台,具体要根据施工地山区特点进行对比分析,得出最优方案。

参考文献:

- [1] 郑文艺.山区公路中小跨径桥梁设计问题探讨[J].黑龙江交通科技, 2019,304(6):112.
- [2] JTG 3362—2018, 公路钢筋混凝土及预应力混凝土桥涵设计规范[S].

(上接第 70 页)

采用相应的构造措施以保证结构的安全。

(3)当横梁跨度较大时,需增加横梁的截面高度以保证桥梁的整体刚度。

(4)钢横梁在吊装就位后、与主梁焊接形成整体前,横梁自身的稳定性不满足要求,需采用临时约束措施以保证横梁结构的稳定性。

参考文献:

- [1] 尚延刚.武汉市唐家墩立交节点设计形式探讨[J].交通科技.2014(3): 72-73.
- [2] 程伟.具有外扩横梁曲线连续钢箱梁的设计与应用[J].隧道与轨道

交通.2018(2):47-49.

- [3] 罗来洋.带外伸横梁的匝道桥上部结构设计研究[D].广州:华南理工大学,2014.
- [4] 凤凰山高架桥和凤凰山路、双沙路、双瑞二路工程(K0+889 至 K0+000)施工图设计[R].成都:中国市政工程设计研究院有限公司. 2014.9.
- [5] 吴冲.现代钢桥(上册)[M].北京:人民交通出版社.2006.
- [6] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
- [7] BS 5400-2:2006.Steel,concrete and composite bridges - Part2:Specification for loads[S].
- [8] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].