DOI:10.16799/j.cnki.csdqyfh.260561

槽型钢梁跨高速随梁集成防护施工技术

李　云[1],王　亮[2]
(1.武汉市政环境工程建设有限公司,湖北 武汉 430000; 2.武汉市市政建设集团有限公司,湖北 武汉 430000)

摘　要: 针对50 m大跨径开口槽型钢梁跨运营高速公路施工中焊接火花坠落风险及传统移动防护棚方案的突出安全隐患,提出一种随梁集成式装配防护托架施工工艺。该工艺在开口槽钢梁底部增设封闭钢板以截留焊渣,在梁体两侧腹板焊接高强吊耳并安装可拆卸三角托架,将防护体系与主梁集成为整体,并利用320 t级架桥机实现一体化同步吊装。通过荷载组合验算,验证了采用集成工艺的钢梁吊耳、斜撑杆及底板的强度、稳定性和刚度均满足规范要求,并且可减少独立吊装次数约75%,缩短施工工期约60%,降低高空作业工时约62.5%,防护构件可周转3~4次,单榀梁防护成本较传统方案降低约35%。结果证明集成工艺可有效解决大跨径钢梁跨线施工中的焊渣坠落和高空防护难题,安全效益与经济效益显著,可为类似跨线桥梁工程提供技术参考。

关键词: 跨运营高速;开口槽型钢梁;集成式防护托架;装配式施工;架桥机吊装
中图分类号: U415　　**文献标志码:** B　　**文章编号:** 1009-7716(2026)11-0328-06

Beam-Integrated Protection Construction Technology for Channel Steel Beams Spanning Expressway

LI Yun[1], WANG Liang[2]
(1. The Fourth Branch of Wuhan Municipal Environment Co., Ltd., Wuhan 430000, China; 2. Wuhan Municipal Construction Group Co., Ltd., Wuhan 430000, China)

Abstract: To address the falling weld-spatter hazards and safety deficiencies of conventional mobile protective shed schemes during the erection of 50 m long-span open-channel steel beams spanning an operating expressway, an integrated assembled protection bracket construction technique is proposed. In this method, the sealed steel plates are added at the bottom of the open-channel beam to intercept the weld slags. The high-strength lifting lugs are welded to both webs of beam and the detachable triangular brackets are mounted, integrating the protection system with the beam for simultaneous hoisting by a 320 t beam-erection machine. Through the combined load calculations, it is verified that the strength, stability and stiffness of the lifting lugs, diagonal struts and bottom plate with the integrated process meet the code requirements. And the independent hoisting operations can be reduced by approximately 75%, the construction period shortened by about 60%, the high-altitude working hours reduced by roughly 62.5%, the protective components reused 3 to 4 times, and the protection cost of a single beam reduced by approximately 35% compared to the traditional schemes. The results prove that the integrated process can effectively solve the problems of slag fall and high-altitude protection in the overpass construction of long-span steel beams. The safety and economic benefits are significant, which can provide technical references for similar overpass bridge projects.

Keywords: spanning operational expressway; open-channel steel girder; integrated protective bracket; prefabricated construction; hoisting with bridge erector

0　引　言

绍兴市越东路上跨杭甬高速大桥,是绍兴市“东西畅通”快速路网的重要组成部分,在跨越杭甬高速时采用了50 m简支钢混组合梁结构。

收稿日期:2026-05-19
作者简介:李云(1992—),男,学士,工程师,技术负责人,从事市政道路、桥梁工程施工工作。

杭甬高速是浙江省内交通负荷最重的主干线之一,日均断面流量超过6万辆,施工期间严禁中断交通;加之高速中央隔离带内埋设有国防军缆,施工期间严禁在中央分隔带立墩或占道搭设地面支架,50 m跨径范围内不允许增设中间墩柱支撑,因此安全防护难度极大。

50 m简支钢混组合梁采用3榀开口槽型钢梁与现浇混凝土桥面板组合而成。开口槽型钢梁为U形

截面下承式结构，由底板和两侧腹板焊接组成，翼缘板在顶部外伸。在组合梁现场安装与拼接过程中[1-2]，需要进行大量的焊接作业，焊接过程中产生的高温焊渣、火花一旦坠落至下方高速公路，极易引发车辆火灾或严重交通事故。因此，如何有效阻绝焊接火花坠落，同时保证防护结构自身安全，成为了该项目施工的关键难题。

传统施工方案参照沿线其他跨越杭甬高速项目及既有越东路大桥的施工经验，拟采用移动装配式防护棚方案。然而经深入论证分析，该方案在该工程 50 m 跨径、不设中间墩柱支撑的特殊条件下，存在结构稳定性不足、频繁二次起吊风险高等突出安全隐患。为此，项目团队在充分研究国内外跨线桥梁施工防护技术的基础上[3-5]，创新提出了随梁集成式装配防护托架工艺。该工艺通过预先在开口槽梁底部封板并在两侧焊接吊耳、安装可拆卸三角托架，将防护体系与主梁集成为一体，并利用架桥机实现同步吊装，从根本上消除了传统防护棚独立吊装的安全风险。

本文将从传统方案的风险分析、集成托架的结构设计、力学验算和施工实施流程等维度，系统阐述该集成工艺在大跨径钢梁跨线施工中的应用实践与技术价值。

1　工程概况

该工程南起绍兴市三江路，北至该市望海路，单幅道路全长约 0.9 km，按城市主干路标准设计，设计车速 40 km/h。桥梁设计荷载等级为城-A 级。工程共新建桥梁 3 座，总长 1 059.3 m，其中大桥 2 座（共长 1 048.4 m），小桥 1 座（长 10.9 m）。E 地面桥与 W 地面桥在跨越杭甬高速处均采用钢混组合梁结构形式（见图 1），单跨跨径 50 m。

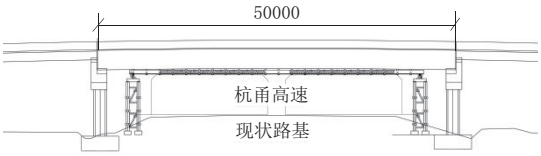


图 1　跨高速部位剖面图（单位：mm）

钢主梁采用工厂分节段预制，节段间在工地现场焊接；桥面板为现浇钢筋混凝土结构。主梁采用 3 箱等高组合梁，截面中心处组合梁总高 2.7 m，其中钢主梁高 2.35 m，混凝土桥面板厚 0.35 m。钢主梁由 3 片开口槽型钢主梁组成，均采用直腹板形式；单片钢主梁腹板中心间距 2.5 m，上翼板宽 0.66 m，梁底宽 2.59 m，相邻 2 片钢主梁腹板中心间距 4.75 m。在钢主梁上翼缘板及支点横隔板上翼缘板上均匀布设剪力钉，以保证钢梁与混凝土桥面板的组合作用。

2　移动装配式防护棚施工工艺与风险分析

2.1　传统防护棚构造组成与实施步骤

在越东路项目初期，参照沿线其他跨越杭甬高速项目以及既有越东路大桥施工方法，原拟采用传统的移动装配式防护棚方案。该方案是国内跨线桥梁施工中较为成熟的安全防护形式[6]，主要由 16 号工字钢顶梁、立柱、导链葫芦、工人操作平台以及爬梯等构件组成。

防护棚平面施工示意图见图 2；既有项目实施的防护底棚见图 3。

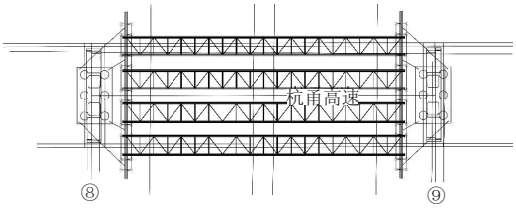


图 2　防护棚平面施工示意图



图 3　既有项目实施的防护底棚

传统防护棚的施工实施遵循以下步骤：

（1）轨道与支架安装。施工人员需在高空手动安装纵向滑道或工字钢横梁，并严格控制防护棚底面与钢梁底部的净距在 50~60 mm 范围内。

（2）独立吊装与就位。大型吊机将装配好的防护棚单元分片起吊（临时支架图见图 4），防护棚单元需与预设的导链葫芦精确对位。

（3）焊接加固。工人在防护棚落位后须将平台与侧支架焊牢固定（防护结构图见图 5），防止施工过程中产生位移或挠度变化。

（4）同步行走控制。在跨线移动过程中，操作人员需通过对讲机协调多个导链葫芦，所有点位必须保持高度同步，以防结构倾斜或坠落。

（5）逆序拆除。施工结束后，工人需按照严格的

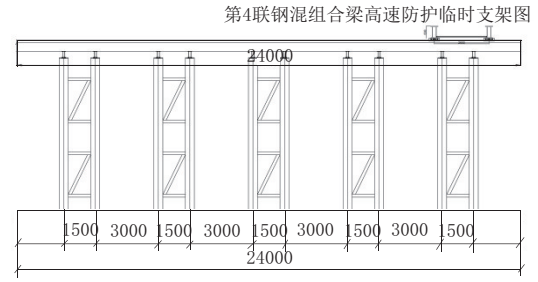


图4　临时支架图（单位：mm）

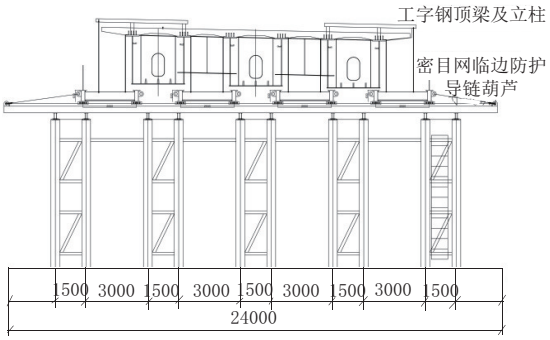


图5　防护结构图（单位：mm）

逆序流程拆除防护棚各构件。

2.2　传统方案核心安全风险评价

经项目部组织专家论证，传统方案在该工程 50 m 跨径、不设中间墩柱的特殊约束条件下，存在以下显著安全风险[7]：

（1）吊装风险高。50 m 跨径需要多片防护棚拼装覆盖，涉及频繁的独立起重作业。每次防护棚起吊和移位均在高速公路上方进行，坠落物击中下方车辆的风险极大。特别是在无中间墩柱支撑的条件下，防护棚自身跨度达到约 50 m，结构自重大、起吊难度高。

（2）人员高空暴露时间长。工人在铺设滑轨、调整支架、焊接加固以及同步行走操控等多个阶段长时间处于悬空状态，人员坠落概率显著增加。据统计，传统方案单次防护棚移位作业约需 4~6 h，全桥施工周期内（以该工程全部梁段为例）累计高空作业工时逾 200 人·时，高空坠落风险贯穿整个施工过程。

（3）结构稳定性差。防护棚属于临时受力结构，在 50 m 无中间支撑跨度条件下，自身挠度大、横向刚度不足。叠加高速公路桥面风效应的影响，移动式轻型框架极易产生摆动或失稳，存在整体倾覆的重大风险[8]。

（4）对高速公路运营影响大。防护棚的安装、移位和拆除均需占用高速公路的行车空间或要求临时封道配合，频繁的施工作业严重影响高速公路的正常通行秩序。

综合上述风险分析，传统移动装配式防护棚方案难以满足该工程的安全要求，亟需研发更为安全、高效的施工防护新技术。

3　随梁集成式装配防护托架方案设计

3.1　方案设计理念

针对传统方案的不足，项目团队提出"防护体系与主梁一体化"的设计理念：将安全防护结构预先集成于钢梁本体之上，利用架桥机一次同步吊装主梁与防护体系，从根本上取消防护棚的独立吊装工序[9-10]。该理念的技术核心包含 3 个层面：

（1）焊渣阻绝层面。在开口槽型钢梁底部增设上下双层钢板，形成封闭腔体，从源头切断焊接火花和焊渣的竖向坠落路径。

（2）立面防护层面。在钢梁两侧腹板外缘焊接高强吊耳并安装可拆卸三角托架，托架上铺设防火隔热板，形成立面全包围的装配式防护体系，有效遮挡侧向飞溅的焊渣火花。

（3）一体吊装层面。防护托架通过吊耳与主梁刚性连接，利用 320 t 级架桥机将主梁与防护体系作为整体进行吊装就位，实现"随梁安装、随梁就位、随梁拆除"的全过程集成。

3.2　集成防护托架构造设计

随梁集成式防护托架主要由以下 3 类构件组成：

（1）底部封闭钢板。在槽梁底板下方增设 1 层厚 6 mm Q345B 钢板，通过间断角焊缝与槽梁底板连接，2 层钢板之间保留约 30 mm 间隙（见图 6）。该间隙的防护机理如下：高温焊渣坠入后受到上下 2 层钢板阻截，在密闭空腔内因散热迅速、氧气不足而快速熄灭，可有效防止焊渣穿透底板坠落至高速公路路面。



图6　底部防护实施图

（2）侧面吊耳。在每榀钢梁两侧腹板外表面，沿梁长方向每隔约 3 m 设置 1 组高强焊接吊耳。吊耳

采用厚 20 mm Q345B 钢板切割加工，通过全熔透坡口焊缝与腹板连接，单个吊耳设计承载力不小于 50 kN。

（3）可拆卸三角托架。三角托架为标准化构件，由角钢和扁钢焊接而成，整体呈直角三角形，斜边长约 1.2 m（见图 7）。托架上弦杆通过高强螺栓与吊耳连接，下弦杆设置挂钩式快拆接口，便于周转使用。托架外侧铺设厚 1.5 mm 镀锌钢板作为防火隔热面板，相邻面板搭接宽度不小于 50 mm，确保无缝覆盖。



图 7　可拆除托架图

3.3　焊接火花阻绝机制

焊接火花的阻绝是本方案的核心安全保障。开口槽型钢梁现场焊接主要包括梁段对接焊缝和剪力钉焊接两类作业，焊接过程中产生的火花和焊渣温度可达 1 500 ~ 1 800 ℃[11]，颗粒直径一般为 0.5 ~ 5 mm。本方案通过 3 道防线实现多层次阻绝：

第 1 道防线：底部双层钢板封闭。6 mm 钢板在槽梁底板下方围成密闭空间，焊渣落入间隙后被物理截留，封闭空气量有限、散热快，焊渣无法持续燃烧。

第 2 道防线：侧面三角托架围护。两侧托架铺设的镀锌钢板形成连续侧面遮挡，有效拦截侧向飞溅的焊渣。镀锌钢板基材熔点约 1 530 ℃，远高于焊渣到达面板时的温度，不会被烧穿。

第 3 道防线：围护底部收口兜底。立面围护体系在底部形成内倾式收口，即使有少量焊渣穿过前 2 道防线，也会被底部收口结构截留，不会直接坠落至高速公路路面。

4　集成防护托架力学验算

4.1　荷载分析

集成防护托架在施工过程中承受以下荷载组合[12-13]：

（1）自重荷载 G_1。防护托架自重包括底部封闭钢板、吊耳、三角托架框架及围护面板等构件重量，经统计，单榀钢梁（长约 50 m）对应的防护托架总重约 8.5 t。

（2）施工活荷载 Q_1。考虑施工人员及小型工具在托架上作业，按 1.0 kN/m² 均布荷载计算。

（3）风荷载 W。桥位处基本风压[14]取 0.40 kN/m²，周边地形属 B 类粗糙度，施工高度约 12 m，将高度系数和托架受风面积代入，计算所得风载标准值相对结构自重较小，不构成控制荷载。

（4）焊渣冲击荷载 F。按单颗焊渣质量 5 g、坠落高度 2 m 计算动力放大系数后，集中荷载约为 0.1 kN，对结构承载影响极小。

4.2　吊耳强度验算

吊耳是防护托架与主梁连接的关键构件，按最不利荷载组合进行验算：

荷载组合：$1.2\,G_1 + 1.4\,Q_1 + 1.4 \times 0.6\,W$。

单个吊耳最大设计拉力 $N = 35$ kN。

吊耳净截面面积（扣除螺栓孔后）$A_{net} = 20 \times (120 - 22) = 1\,960$ mm²；Q345B 钢材设计强度 $f = 295$ MPa。

应力验算：

$\sigma = N/A_{net} = 35\,000/1\,960 = 17.9$ MPa，安全系数 $K = 295/17.9 = 16.5$，满足《钢结构设计标准》（GB 50017—2017）要求，安全裕度充足。把 35 kN 压力除以折减后的有效截面，结果只用到了钢材强度的 1/16，安全裕度极为充足。

焊缝验算：

吊耳与腹板采用双面角焊缝连接，焊脚尺寸为 8 mm，焊缝有效长度为 200 mm，焊缝承载力 $N_w = 2 \times 0.7 \times 8 \times 200 \times 160/1\,000 = 358.4$ kN，远大于 35 kN，焊缝强度满足《钢结构设计标准》要求。

4.3　三角托架稳定性验算

三角托架斜撑杆采用 L75×6 等边角钢，计算长度 $l_0 = 1.0$ m，截面回转半径 $i = 14.8$ mm，长细比 $\lambda = l_0/i = 67.6$，属于中等偏短的受压构件，不易压曲失稳。

查《钢结构设计标准》附表，b 类截面稳定系数 $\varphi = 0.768$，斜撑杆轴力 $N = 28$ kN，截面面积 $A = 8.73$ cm²。

稳定性验算：

$\sigma = N/(\varphi \times A) = 28\,000/(0.768 \times 873) =$

41.8 MPa，不足《钢结构设计标准》中钢材允许应力的1/7，稳定性满足要求。

4.4　底部封闭钢板承载验算

底部钢板按四边简支矩形板受均布荷载计算，跨度取相邻吊耳间距3 m，宽度取槽梁底板宽度0.8 m，板厚6 mm。

在焊渣冲击与自重组合作用下，板中心最大弯矩 M_{max} = 0.12 kN·m，板截面抵抗矩 $W = bt^2/6 = 800 \times 6^2/6 = 4\,800\ mm^3$，最大弯曲应力 $\sigma = M/W = 120\,000/4\,800 = 25.0$ MPa，强度满足《钢结构设计标准》要求。最大挠度为2.1 mm，小于 $l/250$ = 12 mm，满足《钢结构设计标准》要求。

5　施工实施流程与质量控制

5.1　施工准备阶段

（1）材料准备。按设计图纸采购Q345B钢板、角钢、10.9级M20高强螺栓等材料，所有钢材须提供质量合格证明和力学性能检测报告，吊耳焊接工人须持有效焊工合格证上岗。

（2）构件预制。在地面加工场完成底部封闭钢板下料切割、三角托架焊接组装及围护面板预拼装，所有构件编号标识，便于现场对号入座安装。

（3）架桥机起重能力复核。单榀钢梁自重约110 t，加上防护托架约8.5 t，总吊重约118.5 t，不足320 t级架桥机额定起重能力的80%（256 t），满足安全系数要求[15]。

5.2　防护托架安装阶段

防护托架的安装在地面拼装场或已架设就位的桥面上进行，具体步骤如下：

（1）底部封闭钢板安装。将预制钢板吊运至钢梁下方，用定位卡具临时固定后，由焊工以间断角焊缝（焊脚6 mm，焊段长100 mm，间距200 mm）将底板与槽梁底板连接，焊完后逐段检查，不允许有漏焊或虚焊。

（2）吊耳焊接。按图纸在腹板外表面标注吊耳位置后焊接，采用全熔透坡口焊缝。焊完必须做超声波探伤，有未熔合、气孔等内部缺陷的不合格，检测须达到二级才算过关。

（3）三角托架安装。将预制托架通过高强螺栓与吊耳连接，分初拧和终拧2遍完成，终拧后用小锤逐颗敲一遍，听音辨虚实，不牢的当场补拧。

（4）围护面板铺设。在三角托架外侧铺设镀锌钢板面板，相邻面板搭接不小于50 mm，用自攻螺钉固定。铺完后全面检查，确保无缝隙、无脱落。

5.3　一体化吊装阶段

（1）吊装前检查。对托架所有连接部位逐一确认：螺栓紧固、焊缝完好、面板牢固；同时复核架桥机吊具与钢梁吊点的配合情况。

（2）试吊。架桥机将钢梁连同托架整体起吊离地约200 mm，悬停10 min，现场人员绕圈检查各连接部位有无变形、松动或异响，确认无异常后方可正式起吊[16]。

（3）正式吊装。架桥机将钢梁与防护托架整体起吊至设计标高，通过天车纵移和横移系统精确调位，钢梁落座于支座后复核中心线偏位和高程，确认无误后摘钩。

（4）全程安全管控。跨高速吊装之前，手续要先跑完，拿到交管部门施工许可再排计划。吊装当天，下方高速公路布好限速牌和导流锥，安排专职安全员值守。吊装时间尽量选深夜，车流少、风险低；确需封道的，提前配合交管做好封道准备。

5.4　防护托架拆除

组合梁焊接和混凝土桥面板施工完成后，防护托架按“先面板、后托架”的逆序拆除，采用桥梁检修车辅助作业即可完成，无需大型吊机二次进场。拆除的构件分类回收，三角托架和围护面板可在后续梁段施工中周转使用，单套防护托架可周转3～4次，有效降低材料成本。

6　工程应用效果分析

6.1　工效对比

与传统防护棚方案相比，集成式防护托架工艺具有明显优势。两者工效对比见表1。

表1　传统防护棚方案与集成式防护托架工艺工效对比

对比指标	传统防护棚方案	集成式防护托架工艺
独立吊装次数/次	3～4	1（随梁整体）
单榀梁防护安拆工期/d	约2	约0.5
高空作业工时/（人·时）	约40	约15
防护构件周转次数	1～2	3～4
单榀梁防护成本	基准	降低约35%

6.2　经济效益

集成防护托架构件可周转使用3～4次，材料利用率高。综合考虑人工、材料和机械费用，集成工艺的单榀梁防护成本较传统方案降低约35%。同时，由于减少了高速公路封道次数和时间，间接降低了社会交通成本，工程实施效果良好。

7　结　语

（1）传统移动装配式防护棚方案在 50 m 大跨径、无中间墩柱支撑条件下，存在吊装风险高、结构稳定性差、人员高空暴露时间长等突出安全隐患，不适用于该工程。

（2）随梁集成式防护托架通过底部双层钢板封闭、侧面三角托架围护和底部兜底收口 3 道防线，实现了对焊接火花和焊渣的多层次阻绝，有效保障了下方高速公路的通行安全。

（3）防护托架各构件力学验算表明，吊耳、三角托架斜撑杆和底部封闭钢板的强度、稳定性和刚度均满足规范要求，安全裕度充足。

（4）集成工艺实现了防护体系与主梁一体化同步吊装，减少独立吊装次数约 75%，缩短施工工期约 60%，降低高空作业工时约 62.5%，经济效益和安全效益显著。

（5）集成工艺为跨越运营高速公路的大跨径开口槽型钢梁施工提供了一种安全、高效、经济的防护解决方案，可为同类工程提供技术参考。未来可进一步研究防护托架的智能化监测技术，在托架关键部位设置应变和位移传感器，实时监控。施工过程中的结构响应，为安全管控提供数据支撑。

参考文献：

[1] 陈宝春，段兰，吴庆雄，等. 中国钢-混凝土组合结构桥梁研究进展[J]. 土木工程学报，2013，46（6）：110-128.

[2] 周绪红，刘永健，刘界鹏. 装配式钢-混凝土组合结构体系研究与工程应用[J]. 建筑结构学报，2022，43（2）：1-13.

[3] JGJ 80—2016 建筑施工高处作业安全技术规程 [S].

[4] ZJ/ZN 2024-03 市域（郊）铁路工程施工安全技术指南 第 2 部分：桥梁分册 [S].

[5] 张明，李强，王伟. 跨既有铁路桥梁架设施工安全防护技术研究[J]. 公路工程，2020，45（3）：158-163.

[6] 刘志刚，陈涛. 移动防护棚在跨线桥梁施工中的应用与改进[J]. 施工技术，2019，48（12）：72-76.

[7] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 危险性较大的分部分项工程安全管理规定：住建部令第 37 号[Z]. 北京：中华人民共和国住房和城乡建设部.2018.

[8] 张天宇，谢旭，余钱华. 桥梁架设施工安全风险评估方法研究[J]. 工程力学，2018，35（增刊 1）：225-231.

[9] 王宏，赵刚，孙磊. 新型预制装配式钢混组合梁桥关键施工技术研究[J]. 钢结构（中英文），2020，35（8）：47-53.

[10] 程烨，解来江. 城市高架简支小箱梁式钢-混组合梁桥设计分析[J]. 市政技术，2017，35（5）：89-93.

[11] 中国焊接学会. 焊接手册[M].3 版. 北京：机械工业出版社，2016.

[12] Anami K, Miki C, Tani H. Fatigue strength of web-gusset welded joints for beam flanges[J]. International Journal of Fatigue, 2005, 27（10-12）：1136-1146.

[13] Wardenier J, Packer J A, Zhao X L, et al. Hollow sections in structural applications[M]. 2nd ed. Geneva: CIDECT, 2010: 1-50.

[14] GB 50009—2012 建筑结构荷载规范 [S].

[15] GB 26469—2011 架桥机安全规程 [S].

[16] JTG/T 3650—2020 公路桥涵施工技术规范 [S].