文章编号:1674-2974(2025)03-0047-13 DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2025026

工字梁组合刚构桥墩梁节点传力机理与设计方法

黄育凡[1,2],陈凌杰[1],吴庆雄[1,3†],林飞鸿[1]
(1. 福州大学 土木工程学院,福建 福州 350116;
2. 福建省土木工程多灾害防治重点实验室,福建 福州 350116;
3. 工程结构福建省高校重点实验室,福建 福州 350116)

摘 要:工字梁组合刚构桥墩梁节点受力复杂,墩梁节点传力机理与荷载分配规律尚不明确,且缺乏相应的墩梁节点计算方法.通过对比工字梁组合刚构桥墩梁节点试验结果,采用验证后的实体有限元计算模型,根据墩梁节点各部件在桥墩轴力、弯矩、剪力单独作用下的受力状态,分析墩梁节点的传力机理和荷载承担占比,建立各部件的设计计算方法,并开展工字梁组合刚构桥试设计.结果表明:墩梁节点的轴力和弯矩传递机理和路径接近,剪力传递机理有所区别;纵梁与横梁各承担45%~55%荷载传递,轴压力和轴拉力作用下纵梁传力路径及荷载承担占比有所变化,直接由纵梁传递的荷载主要通过纵梁下翼缘传递,传递至横梁的荷载主要由横梁腹板栓钉承担.纵梁设计应考虑桥墩截面附加应力,横梁按照简支梁均布荷载受力模式计算,横梁腹板连接件设计按承担所有传递至横梁的荷载计算,纵梁腹板栓钉及下翼缘栓钉按照构造要求配置.试设计桥梁墩梁节点验算满足要求,有限元分析与理论计算结果相符,建立的墩梁节点设计方法可适用于工字梁组合刚构桥设计.

关键词:组合桥梁;节点;有限元分析;传力机理;计算方法
中图分类号:U443.37 **文献标志码**:A

Force Transmission Mechanism and Design Method on Pier-beam Connection of I-shaped Composite Rigid Frame Bridge

HUANG Yufan[1,2], CHEN Lingjie[1], WU Qingxiong[1,3†], LIN Feihong[1]
(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350116, China;
2. Fujian Provincial Key Laboratory on Multi-Disasters Prevention and Mitigation in Civil Engineering, Fuzhou 350116, China;
3. Key Laboratory of Civil Engineering, Fujian Province University, Fuzhou 350116, China)

Abstract: The stress of pier-beam connections of Ⅰ-shaped steel-concrete composite rigid frame bridges is complex, the force transmission mechanism and load distribution of pier-beam joints are still unclear, and the calculation method of pier-beam joints is lacking. By comparing the test results of the pier-beam joints of the Ⅰ-shaped composite rigid frame bridges, the verified solid finite element calculation model is adopted. According to the stress state of each component of the pier-beam joint under the action of the axial force, bending moment and

* **收稿日期**:2024-03-22
基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608125),National Natural Science Foundation of China(51608125);福建省自然科学基金项目(2022J01093),Fujian Natural Science Foundation Project(2022J01093)
作者简介:黄育凡(1986—),男,福建罗源人,福州大学副研究员,博士
† 通信联系人,E-mail:wuqingx@fzu.edu.cn

shearing force of the pier, the force transmission mechanism and load bearing ratio of the pier-beam joint are analyzed. The design calculation method of each component is established, and the trial design of the Ⅰ-shaped composite rigid frame bridge is carried out. The results show that the force transmission mechanism and path of axial force and bending moment are similar, and the shearing force transmission mechanism is different. The longitudinal beam and the transverse beam bear 45%~55% of the load transfer, respectively. Under the action of axial pressure and axial tension, the load transfer path and the load bearing proportion of the longitudinal beam change. The load directly transmitted by the longitudinal beam is mainly transmitted through the lower flange of the longitudinal beam, and the load transmitted to the transverse beam is mainly borne by the studs of the web. The design of the longitudinal beam should consider the additional stress of the pier load. The transverse beam is calculated according to the uniform load force mode of the simply supported beam. The design of the transverse beam web connector is calculated according to the load transferred to the transverse beam. The studs of the longitudinal beam web and lower flange are arranged by structural requirements. The pier-beam joint of trial design bridges meets the requirements. The finite element calculation results are consistent with the theoretical calculation results. The established pier-beam joint design method can be applied to the design of Ⅰ-shaped composite rigid frame bridges.

Key words: composite bridges; joints; finite element analysis; force transmission mechanism; calculation method

预应力混凝土连续刚构桥在我国桥梁建设中具有广泛运用[1-3],然而这类桥型随着使用年限增加,容易发生不同程度的病害问题,主要表现为混凝土主梁开裂以及跨中下挠[4]. 组合刚构桥能够避免传统混凝土连续刚构桥的结构病害问题,节省成桥运营后的维护费用[5-6]. 在组合刚构桥中,若要使上部结构内力有效地传递至桥墩,保证墩梁节点的牢固性是设计关键,构造形式应满足“强节点,弱构件”的设计原则,使墩梁节点的破坏滞后于主梁和桥墩[7].

为研究工字梁组合刚构桥墩梁固结节点的合理构造形式及受力特性,国内外学者依托已有工程案例展开试验研究. 结果表明,墩梁节点受力性能与其构造形式、混凝土约束程度、界面有效连接程度等因素密切相关. Takeshi 等[8]针对鲤川桥的墩梁节点进行缩尺模型试验,结果表明当墩梁节点不设置横梁连接构造时,钢混结合部混凝土受约束程度较低,数次循环加载周期后桥墩主筋与混凝土间的黏结发生破坏,滞回曲线表明节点耗能水平较低. Nakamura 等[9]以朝见川桥的墩梁节点为原型展开往复加载试验,构件的破坏形态体现为钢主梁下翼缘侧的混凝土压溃且钢筋屈服. 滞回曲线饱满,试验表明设有横梁连接构造的墩梁节点,结合部混凝土受约束程度较高,具有良好的耗能能力及结构延性. 我国学者白玲等[10-11]、宋晓宇等[12]应用有限元软件 MSC.Nastran 针对双工字组合梁的墩梁节点展开传力机制分析,剪力键的剪力分布情况表明该构造形式可以有效地传递墩梁节点内力. Bamrungwong 等[13]和 Sato 等[14]对钢筋锚固式墩梁节点展开数值模拟和试验研究,发现钢混结合部混凝土处于多向受力的复杂状态,且墩梁节点的界面特征复杂,认为发挥墩梁节点的最大承载能力需要确保钢与混凝土之间的界面有效连接. Fujiwara 等[15]和 Minakawa 等[16]通过试验和有限元分析发现桥墩主钢筋锚入钢混结合部足够长度是保证墩梁节点承载力的关键,并提出桥墩主钢筋的锚固长度要求.

目前我国钢混组合梁桥设计规范中尚未有关于组合刚构桥的设计规定,墩梁节点传力机理与荷载分配规律不明确,相关设计理论较少,不利于这一桥型的工程推广建设. 为此,本文开展墩梁节点传力理论分析,通过对比工字梁组合刚构桥墩梁节点试验结果,采用验证后的实体有限元计算模型,根据墩梁节点各部件在桥墩轴力、弯矩、剪力单独作用下的受力状态,分析墩梁节点的传力机理和荷载承担占比,验证传力理论的正确性,并建立墩梁节点各部件设计计算方法. 基于我国装配化工字组合梁钢桥通用图,开展工字梁组合刚构桥试设计,研究成果可为工字梁组合刚构桥墩梁节点设计提供参考.

1　墩梁节点传力理论分析

1.1　节点构造

本文所研究的工字梁组合刚构桥墩梁节点构造如图1所示,采用栓钉作为墩梁结合部连接件,纵梁(即钢主梁)贯通桥墩,与横梁围成封闭区域,分别在横、纵梁腹板及其下翼缘设置栓钉,RC桥墩的主筋伸入封闭区域,最后浇筑混凝土使墩梁固结形成整体.

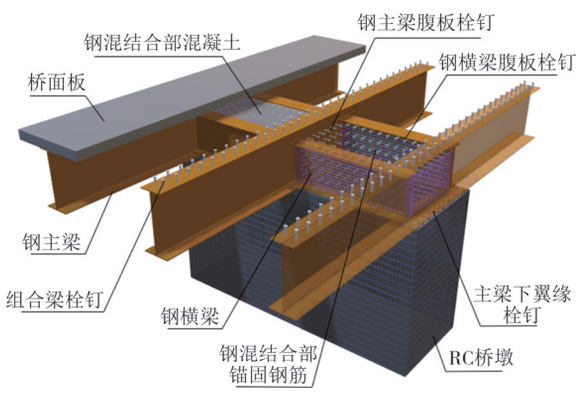


图1　工字梁组合刚构桥墩梁节点构造示意图

Fig.1　Configuration of pier-beam joints for I-shaped steel-concrete composite rigid frame bridge

1.2　传力模式

工字梁组合刚构桥墩梁节点的受力如图2所示.M、S和N分别为墩梁结合处的弯矩、水平力和竖向力.按照接触关系定义传力路径,主梁轴力、弯矩和剪力主要通过两种路径传递至桥墩:一是纵梁下翼缘与桥墩接触、纵梁腹板与结合部混凝土通过剪力键连接,内力由纵梁直接传递到墩梁节点区域和桥墩;二是横梁与结合部混凝土通过剪力键连接,内力由纵梁传递到横梁,再由横梁传递到墩梁节点区域和桥墩.

1.2.1　轴力传递

墩梁节点轴力传递路径如图3所示,Q_1和Q_2分别为纵梁正截面1-1、2-2位置处与N对应的竖向剪力.由节点受力平衡可知,$N=Q_1+Q_2$.纵梁截面竖向剪力经传力路径形成桥墩截面轴力.力的方向不同将导致轴压力与轴拉力传力路径及荷载传递占比有所区别,根据接触关系将轴力N的传力路径汇总于表1.

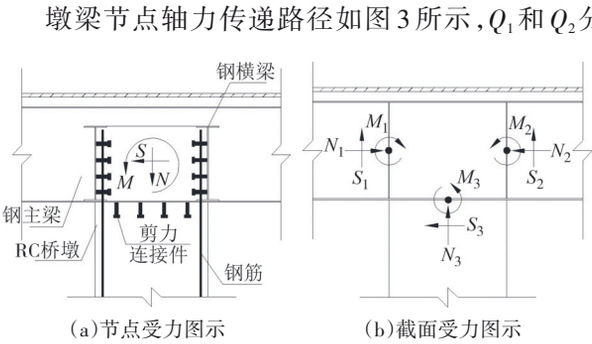


图2　墩梁节点受力示意图

Fig.2　Free-body force diagram for pier-beam joint

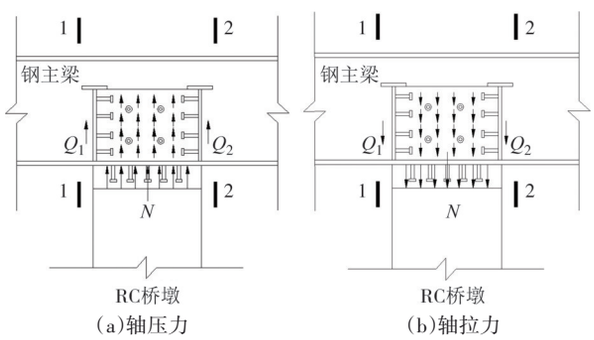


图3　轴力N传力机制示意图

Fig.3　Transfer mechanism of axial force N

表1　轴力N传力路径

Tab.1　Transmission path of axial force N

传力方式	传力路径
纵梁传力	桥墩→结合部混凝土(轴拉力)→纵梁下翼缘→纵梁
	桥墩→结合部混凝土→纵梁腹板连接件→纵梁
横梁传力	桥墩→结合部混凝土→横梁腹板连接件→横梁→纵梁
	桥墩→结合部混凝土→横梁翼缘→横梁→纵梁

1.2.2　弯矩传递

墩梁节点弯矩传力机制如图4所示,M_1、M_2分别为纵梁正截面1-1、2-2位置处与M对应的弯矩,由节点受力平衡可知,$M=M_1+M_2$,最不利荷载组合情况下,墩梁节点位置纵梁两侧弯矩方向相反.纵梁弯矩经传力路径形成桥墩截面弯矩,可将弯矩分解成等效线性荷载力偶形式,桥墩截面分为受压区和受拉区,σ_c为受压区线性荷载最大集度,σ_t为受拉区线性荷载.受压区和受拉区力的方向分别与桥墩轴压力和轴拉力相同,因此弯矩传力路径及荷载传递占比与轴力传递模式一致.

1.2.3　剪力传递

墩梁节点剪力传力机制如图5所示,Q为桥墩截面剪力,N_1和N_2分别为纵梁正截面1-1、2-2位置处与Q对应的轴力.由节点受力平衡可知,$Q=N_1+N_2$.纵梁截面轴力经传力路径形成桥墩截面剪力.剪力方向与轴力和弯矩方向正交,设计时可单独考虑剪力作用,将剪力Q传力路径汇总于表2.

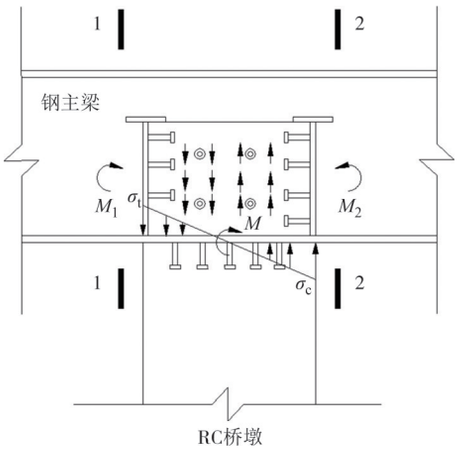


图4 弯矩M传力机制示意图

Fig.4 Transfer mechanism of bending moment M

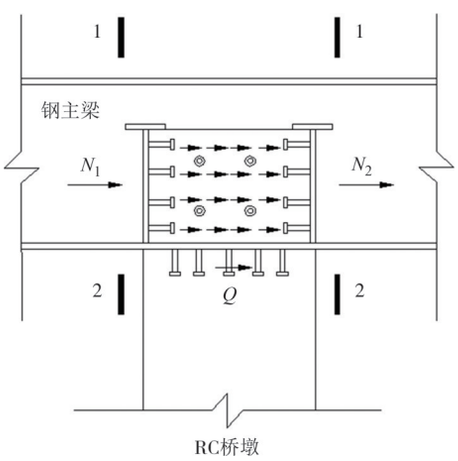


图5 剪力Q传力机制示意图

Fig.5 Transfer mechanism of shearing force Q

表2 剪力Q的传力路径

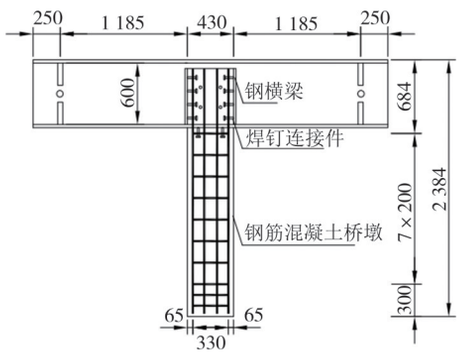
Tab.2 Transmission path of shearing force Q

传力方式	传力路径
纵梁传力	桥墩→纵梁下翼缘栓钉→纵梁
	桥墩→纵梁下翼缘→纵梁
	桥墩→结合部混凝土→纵梁腹板连接件→纵梁
横梁传力	桥墩→结合部混凝土→横梁→纵梁
	桥墩→结合部混凝土→横梁腹板连接件→横梁→纵梁

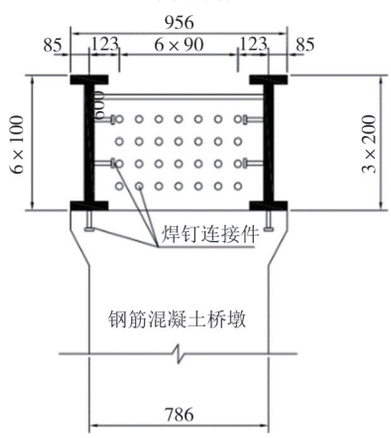
2 墩梁节点传力机理分析

2.1 墩梁节点模型试验

为探明墩梁节点传力机制和荷载传递比,采用有限元方法,对Sasaki等[17]介绍的墩梁节点模型试验开展验证,试验构件如图6所示.纵梁与横梁焊接形成箱形封闭区域,不考虑混凝土桥面板作用.采用栓钉作为剪力连接件,纵梁腹板设置4根栓钉,下翼缘设置2根栓钉,横梁腹板设置4×7阵列的栓钉,栓钉规格为Φ16×80 mm.桥墩主钢筋伸入结合部区域,浇注混凝土使桥墩与纵梁形成整体.试验构件所用钢材参数如表3所示.



(a)立面图



(b)侧面图

图6 文献[17]介绍的墩梁节点试验构件示意图(单位:mm)

Fig.6 Test components described in literature [17] (unit: mm)

表3 试验构件材料参数

Tab.3 Material parameters of test component

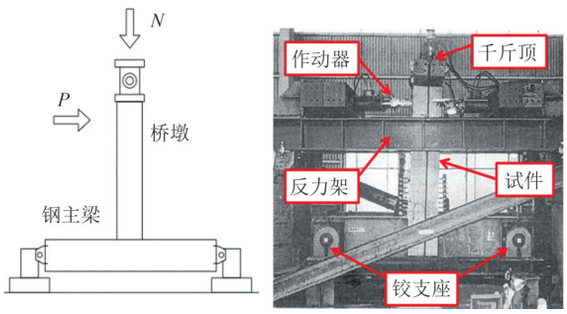
材料	规格	密度/(kg·m^{-3})	弹性模量/MPa	泊松比	屈服应力/MPa	抗压强度/MPa
钢梁	SS400	7 850	210 000	0.30	245	—
钢筋	SD345	7 850	210 000	0.30	388	—
混凝土	30	2 600	28 000	0.17	—	29.3

采用倒置式加载方案取反弯点位置纵梁长度,梁端设置铰支座.施加定轴力N模拟桥墩轴压力作用,通过施加水平力P进行拟静力加载,如图7所示.

2.2 有限元计算模型与结果对比

2.2.1 节点实体模型建立

采用有限元通用软件ABAQUS建立模型试验实体有限元模型,如图8所示.该模型包含纵梁、横梁、栓钉、RC桥墩、结合部混凝土、钢筋6个部分.钢筋采用T3D2桁架单元模拟,其余部件采用C3D8R实体单元模拟.本构关系根据文献[18]取值,试验构件混

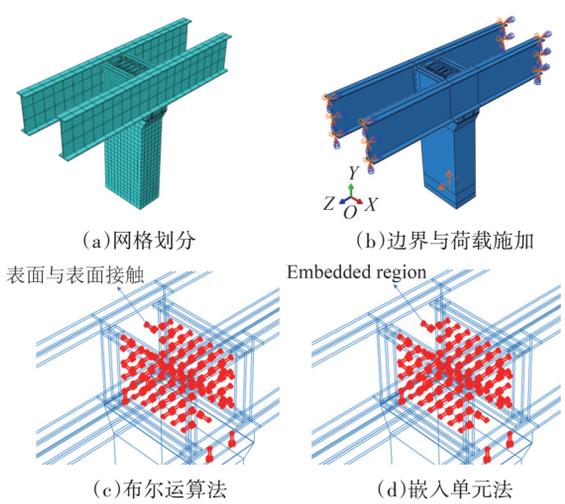


(a)加载方式　　(b)试验照片

图 7　墩梁节点试验加载示意图

Fig.7　Pier-beam joint test loading method

凝土强度等级为30,基于连续介质损伤力学理论深化的本构关系能够同时描述弹性损伤和塑性变形,提高计算结果的准确性.在ABAQUS中采用CDP模型模拟混凝土浇筑初始微观缺陷导致的刚度退化和塑性变形.钢梁、钢筋和栓钉采用双线性塑性本构.



(a)网格划分　　(b)边界与荷载施加

(c)布尔运算法　　(d)嵌入单元法

图 8　试验有限元计算模型

Fig.8　Finite element calculation model of test

Liu 等[18]对 Sasaki 等[17]开展的模型试验进行了有限元分析,将栓钉连接件模拟为虚拟非线性连接弹簧进行分析,但对弹簧刚度取值未进行明确说明.本文为研究带有栓钉实体单元的建模方法,对比不同建模方法的计算精度和效率,分别采用布尔运算(boolean calculation)法和嵌入单元(embedded region)法模拟栓钉-混凝土接触关系.根据试验加载方案,在纵梁端部截面施加沿模型坐标系 Y、Z 方向(竖向、纵向)的平动约束与绕 Y、Z 轴(竖向、纵向)的转动约束,释放绕 X 轴的转动约束,模拟纵梁反弯点边界条件.试验构件的加载力包括指向倒置构件桥墩顶部的单向水平荷载 P 和指向桥墩轴向的定轴力 N.

2.2.2　荷载-位移曲线对比分析

试验结果表明,当 P 增加至 60 kN 时,桥墩根部受拉侧开始有裂缝产生;当 P 增加至 140 kN 时,纵梁下翼的栓钉连接件发生拉拔破坏;当 P 增加至 215 kN 时,纵梁下翼缘与桥墩交界面钢筋开始屈服;当 P 增加至 265 kN 时,受压侧混凝土发生破坏,破坏位置位于钢筋混凝土桥墩与纵梁交接处,栓钉头部处混凝土裂缝呈环状连接交界面,受拉侧钢筋完全屈服,如图 9 所示.试验构件的设计荷载为 P=78.4 kN,试验构件在承载能力极限状态下承受的水平荷载是设计荷载的3倍,说明该类型墩梁节点传力可靠.

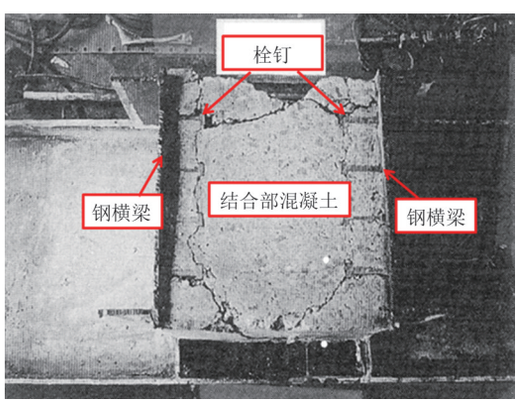


图 9　加载结束后墩梁节点破坏状况

Fig.9　Pier-beam joint damage situation after loading

本文有限元计算与试验得到的加载点荷载-位移曲线对比分析如图 10 所示.当桥墩受拉侧混凝土达到极限拉应力时,分别采用布尔运算法和嵌入单元法,二者水平作用力 P 分别为 61.7 kN 和 62.3 kN,较试验结果大 2.8% 和 3.8%;当桥墩受拉侧主钢筋达到屈服应力时,二者水平作用力 P 为 225.8 kN 和 230.3 kN,较试验结果大 5.0% 和 7.1%,此时桥墩根部钢筋应变受水平作用力的影响显著提升;当桥墩受拉侧钢筋及其压缩侧混凝土达到极限强度时,二者的水平作用力 P 为 275.3 kN 和 279.5 kN,较试验结果大 3.9% 和 5.5%.钢筋最大应变均出现在桥墩根部位置,P=265 kN 时桥墩根部受拉侧主钢筋应变结果对比如图 11 所示,有限元计算结果与试验结果吻合良好.

2.2.3　栓钉连接件受力对比分析

文献[18]采用有限元分析得到试验模型横梁腹板各排栓钉中的剪力最大值及纵梁腹板栓钉的受力情况如图 12 所示.受压侧栓钉剪力指向纵梁,受拉侧栓钉剪力指向桥墩,剪力方向取受压侧栓钉的受力方向为正,受拉侧栓钉受力方向为负.本文采用

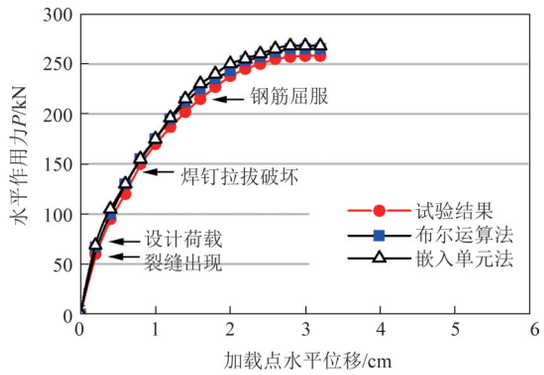


图 10 加载点荷载-位移曲线对比

Fig.10 Comparison of load-displacement curves at loading point

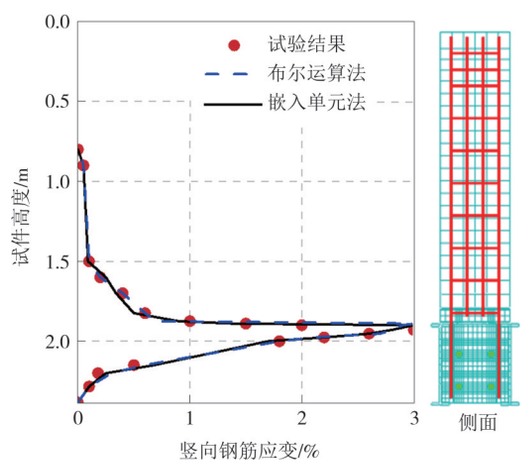
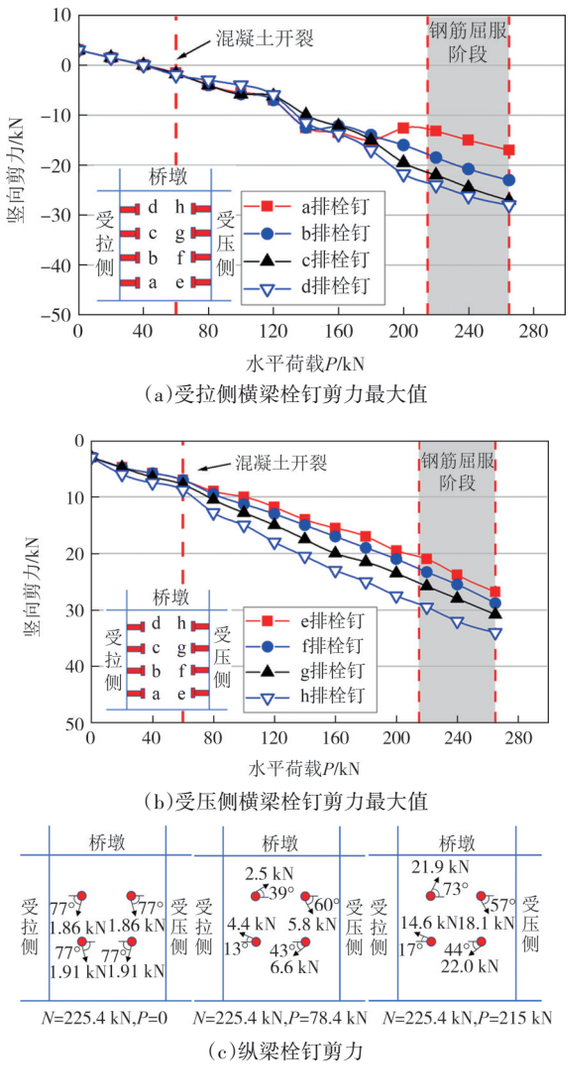


图 11 节点破坏状态下钢筋应变对比

Fig.11 Comparison of steel bar strain under the failure state of the joint

嵌入单元法计算得到栓钉受力分布如图 13 所示.可以看出,本文有限元模型的栓钉受力计算结果与文献[18]有限元计算结果变化趋势较为一致.对比不同位置处栓钉受力规律可以看出,在加载初期,各排焊钉均较为均等地分担剪力,当桥墩受拉侧混凝土达到开裂应力后,各排栓钉受力差距逐步增大,靠近桥墩截面的d、h排栓钉所受剪力较大,远离桥墩截面的a、e排栓钉所受剪力较小,受压侧横梁栓钉所受剪力大于受拉侧横梁栓钉,横梁腹板栓钉受力大于纵梁腹板栓钉.

通过对比墩梁节点试验的荷载-位移曲线、荷载-应变曲线以及有限元模型的栓钉受力情况,验证了本文有限元建模方法的正确性,采用布尔运算法和嵌入单元法,均能较好地模拟墩梁节点宏观力学性能.布尔运算法的计算精度和准确性较高,适用于小尺寸的试验构件模拟;嵌入单元法的运算效率较高,适用于实桥模型计算.



(a)受拉侧横梁栓钉剪力最大值

(b)受压侧横梁栓钉剪力最大值

(c)纵梁栓钉剪力

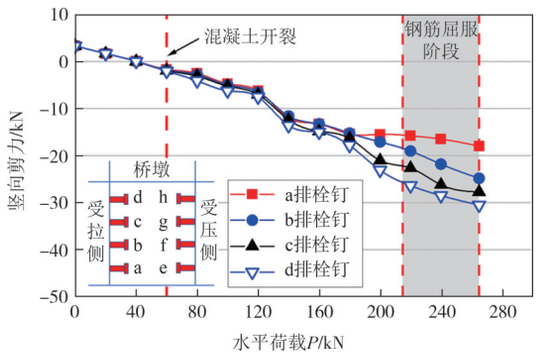
图 12 文献[18]中有限元计算栓钉受力分布情况

Fig.12 Force distribution of shear studs of FEM in literature [18]

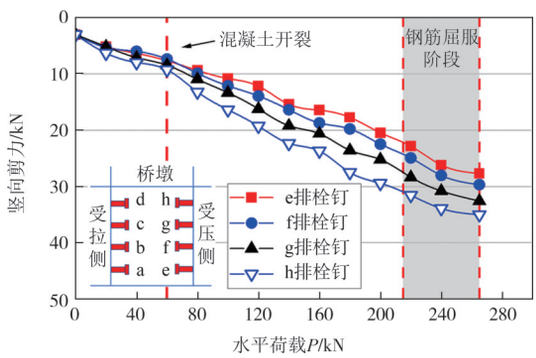
2.3 传力机理与荷载分配

2.3.1 轴力传递

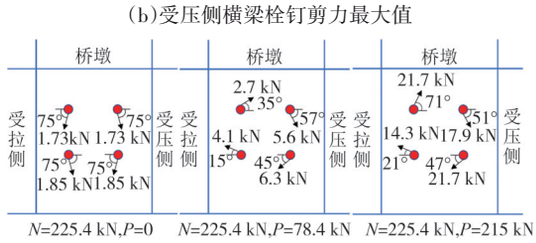
为了解墩梁节点在轴力单独作用下传力规律和应力分布情况,在桥墩端部分别单独施加 200 kN 轴压力和 200 kN 轴拉力.分别提取主梁、横梁、混凝土和栓钉竖向剪力,各传力路径的荷载传递占比与轴力作用的变化关系如图 14、图 15 所示.轴压力作用下,直接传递至纵梁的荷载占比稳定在 55%,经横梁传递至纵梁的荷载占比稳定在 45%;轴拉力作用下,直接传递至纵梁的荷载占比稳定在 45%,经横梁传递至纵梁的荷载占比稳定在 55%;无论是轴压力还是轴拉力作用,经横梁腹板栓钉传递至横梁的荷载均稳定在 70%,经结合部混凝土传递至横梁的荷载占比均稳定在 30%.轴拉力传递较轴压力传递增加了结合部混凝土作为传力媒介,从而各传力路径的



(a)受拉侧横梁栓钉剪力最大值



(b)受压侧横梁栓钉剪力最大值



(c)纵梁栓钉剪力

图 13　本文有限元计算栓钉受力分布情况

Fig.13　Force distribution of shear studs of FEM in this essay

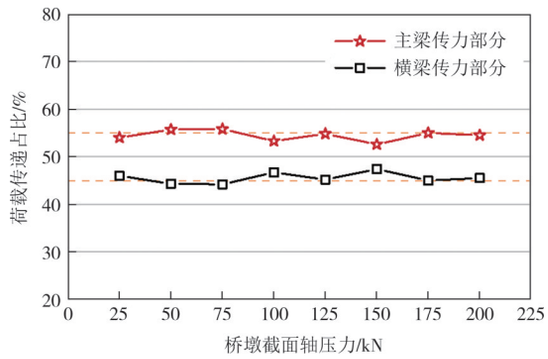
荷载承担比例发生变化,表现为轴拉力的传递过程中纵梁下翼缘与桥墩混凝土之间的传力作用减弱,而横梁传力作用增强.荷载通过结合部区域混凝土及栓钉连接件传递至横梁的比例不受轴力作用方向影响.

2.3.2　弯矩传递

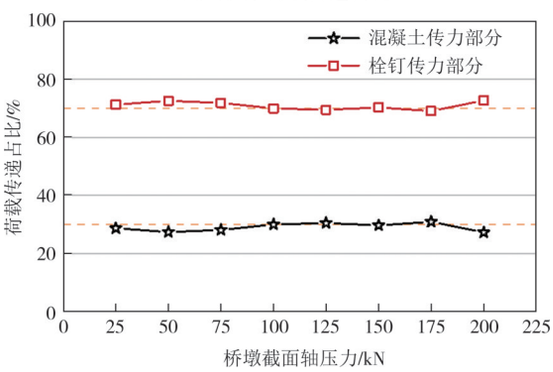
为了解墩梁节点在桥墩截面弯矩单独作用下的传力规律和应力分布情况,在桥墩截面单独施加200 kN·m弯矩,分别提取主梁、横梁、混凝土和栓钉竖向剪力,得到各传力路径的荷载传递占比与弯矩作用的变化关系如图16、图17所示,荷载传递占比与轴力作用情况相同.

2.3.3　剪力传递

为了解墩梁节点在剪力单独作用下传力规律和应力分布情况,在桥墩截面沿纵桥向单独施加200 kN的剪力作用,分别提取主梁、横梁、混凝土和栓钉水



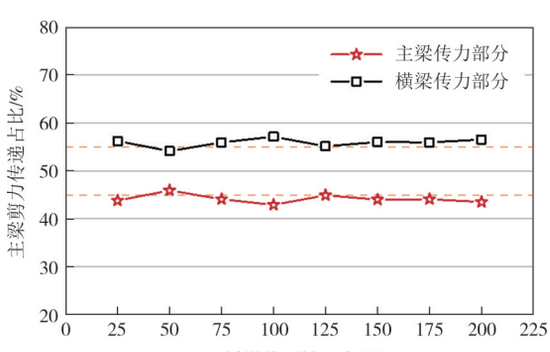
(a)纵、横梁荷载传递占比



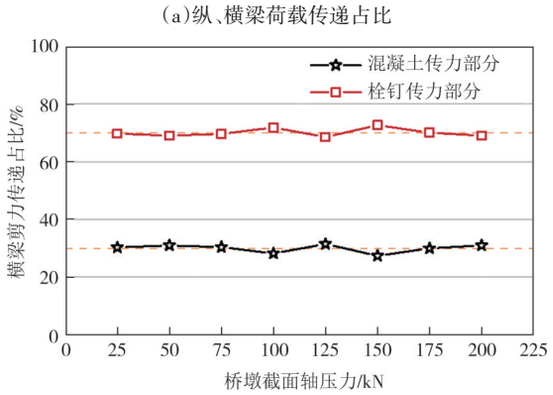
(b)横梁各部件荷载传递占比

图 14　轴压力作用下传力路径荷载传递占比

Fig.14　Load bearing ratio of force transmission path under axial pressure



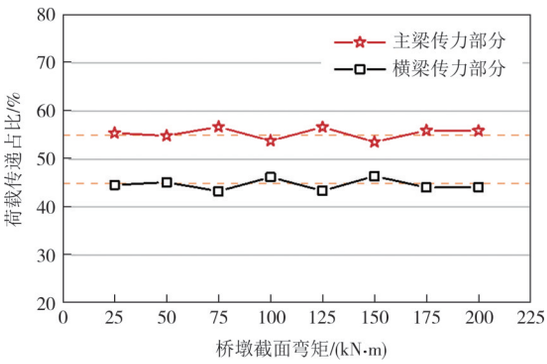
(a)纵、横梁荷载传递占比



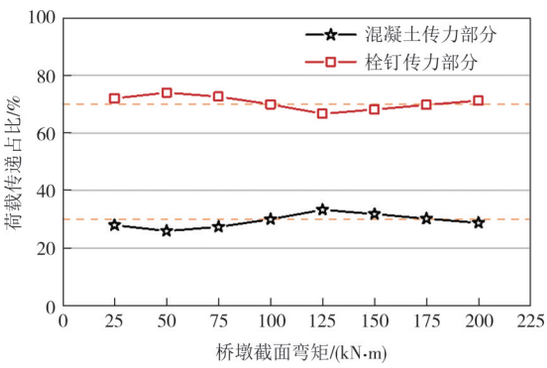
(b)横梁各部件荷载传递占比

图 15　轴拉力作用下传力路径荷载传递占比

Fig.15　Load bearing ratio of force transmission path under axial tension



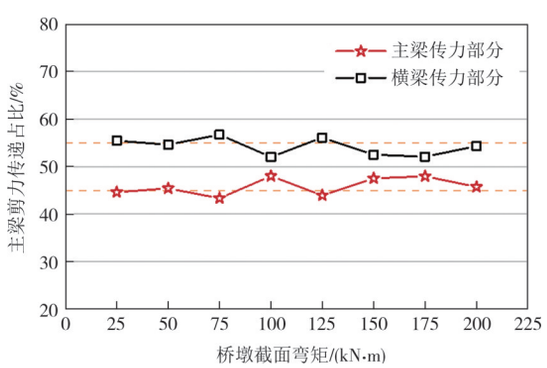
(a)纵、横梁荷载传递占比



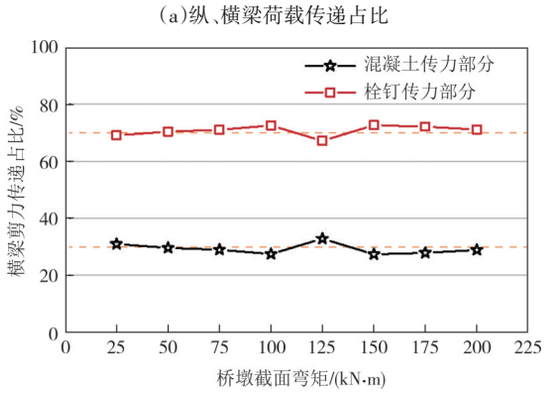
(b)横梁各部件荷载传递占比

图 16 弯矩作用下受压侧传力路径荷载传递占比

Fig.16 Load bearing ratio of force transmission path of compression side under bending moment



(a)纵、横梁荷载传递占比

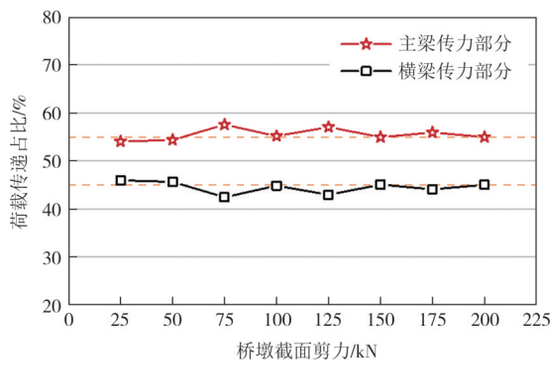


(b)横梁各部件荷载传递占比

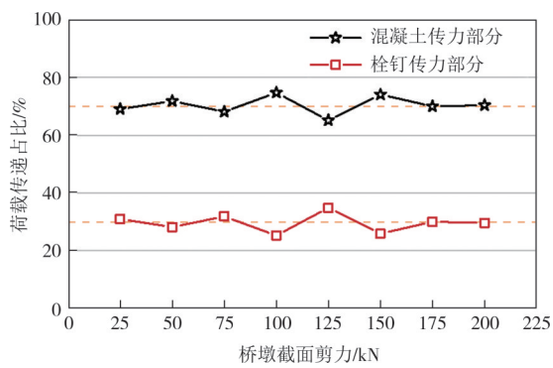
图 17 弯矩作用下受拉侧传力路径荷载传递占比

Fig.17 Load bearing ratio of force transmission path of tension side under bending moment

平剪力,计算得到各传力路径的荷载传递占比与剪力作用的变化关系如图 18 所示. 可以看出,纵梁直接传力部分的荷载传递占比稳定在 55%,经横梁传递至纵梁的荷载占比稳定在 45%;横梁传力路径中腹板栓钉荷载传递占比稳定在 30%,结合部混凝土荷载传递占比稳定在 70%. 纵桥向剪力传力路径方向不同于轴力和弯矩传递,需要单独计算. 纵梁传力部分大于横梁传力部分,纵梁传力部分主要由纵梁下翼缘栓钉传递,纵梁腹板栓钉传力较小. 横梁腹板连接件对于纵桥向剪力作用传力贡献较小,横梁传力路径主要通过结合部混凝土传递.



(a)纵、横梁荷载传递占比



(b)横梁各部件荷载传递占比

图 18 剪力作用下各传力路径荷载传递占比

Fig.18 Load bearing ratio of force transmission path of every side under shearing force

3 墩梁节点设计方法

3.1 设计原则基本假定

目前,国内设计规范暂无专门用于墩梁节点设计方法,根据墩梁节点传力机制分析结果,并结合日本钢桥技术研究会钢与混凝土复合构造研究部、日本桥梁建设协会、日本高速道路株式会社等关于组合刚构桥刚结部实例设计资料[19-21],建立适用于上部结构为双纵梁或多纵梁设计、横梁腹板采用栓钉

连接件的工字梁组合刚构桥墩梁节点设计计算方法,采用以下设计原则:①横梁上栓钉连接件承担所有传递至横梁的荷载;②受拉侧横梁承担55%荷载传递,受压侧横梁承担45%荷载传递;③横梁视作受到均匀分布荷载作用的简支梁进行设计;④横梁设计考虑车道荷载横桥向偏心影响系数;⑤纵梁在墩梁节点部位验算需考虑桥墩附加应力;⑥纵梁腹板栓钉及下翼缘栓钉构造设计按《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)[22]要求.在以下计算方法中,纵梁截面内力分别记作N_1、M_1、Q_1,桥墩截面内力分别记作N_3、M_3、Q_3.

3.2　纵梁设计方法

墩梁节点区域纵梁设计以受力较大纵梁内力条件进行,纵梁应力值应当小于材料容许应力值,组合应力值安全系数取1.2.按照设计原则,应考虑桥墩弯矩对纵梁所产生附加剪切力Q_m:

$$Q_m = \frac{M_3}{D} \tag{1}$$

式中:D为桥墩纵桥向宽度.

根据《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)第11.2.1~11.2.2条,组合梁负弯矩区承载力计算应计入混凝土板翼缘有效宽度内纵向钢筋的作用,组合梁截面的剪力全部由钢梁腹板承担,不考虑混凝土板的抗剪作用.在桥墩受压侧,附加剪切力与纵梁剪力同向,剪应力相加增大,以此校核纵梁应力.纵梁正应力及剪应力按下式计算:

$$\sigma = \frac{N_1}{A_{cq}} + \frac{M_1}{W_{cq}} \tag{2}$$

$$\sigma \leqslant \sigma_a \tag{3}$$

$$\tau_1 = \frac{Q_1}{A_w};\ \tau_2 = \frac{Q_m}{A_w} \tag{4}$$

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 \leqslant \tau_a \tag{5}$$

$$\left(\frac{\sigma}{\sigma_a}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{\tau_a}\right)^2 \leqslant 1.2 \tag{6}$$

式中:σ为由N_1、M_1作用产生的纵梁正应力最大值;σ_a为组合梁截面容许应力值;τ_1为由Q_1产生的纵梁剪应力最大值;τ_2为桥墩弯矩作用产生的附加剪应力值;τ_a为容许剪应力值;A_{cq}为工字组合梁换算截面面积;W_{cq}为工字组合梁换算截面抵抗矩;A_w为纵梁的腹板截面积.

3.3　横梁设计方法

墩梁节点需要足够横梁刚度以提高混凝土受约束程度,将横梁与纵梁腹板及翼缘采用焊接形式连接有利于提高横梁面外刚度,可有效防止结合部混凝土压溃而向外膨胀.在承载能力极限状态下,结合部横梁不仅作为荷载传递构件,还能防止结合部混凝土发生塑性破坏.考虑到维护管理所需的检查通道以及施工过程移动架桥机设置需要,应适当降低横梁高度,文献[19]建议横梁与纵梁高度比值设置在0.7左右.

墩梁节点的荷载作用形式如图19所示,包括直接作用于纵梁的荷载P_g及直接传递至横梁的作用力P_f.由于纵梁与横梁之间的焊接工艺所提供的约束水平不足以使得横梁的边界条件与理想固定梁完全一致,因此横梁受力模型的实际边界约束状况介于两端固定梁和简支梁之间.考虑到设计方法应具备充足的安全性,将横梁视作以纵梁间距为跨度的简支梁进行计算.

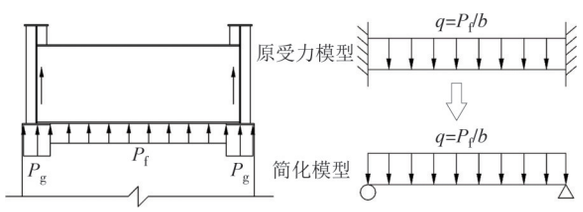


图19　横梁作用力计算模型

Fig.19　Transverse beam force calculation model

将横梁上的作用力等效转换为均布荷载,荷载集度q计算方法如下:

$$q = P_f/b \tag{7}$$

$$P_f = \max\left(P_t, P_c\right) \tag{8}$$

$$P_t = \left(\frac{N}{2} - \frac{M}{D}\right) \times 55\%/(n-1) \tag{9}$$

$$P_c = \left(\frac{N}{2} + \frac{M}{D}\right) \times 45\%/(n-1) \tag{10}$$

式中:b为纵梁间距;P_t为受拉侧横梁荷载设计值;P_c为受压侧横梁荷载设计值;P_f为横梁荷载设计值;n为纵梁片数.

横梁以纯钢梁截面形式进行计算,求得作用于横梁上的均布荷载集度q后,按简支梁在均布荷载作用下的内力对横梁进行校核:

$$\sigma = \frac{M_h}{W_h} < \sigma_a \tag{11}$$

$$\tau = \frac{Q_h}{A_{wh}} < \tau_a \tag{12}$$

式中:M_h为横梁简化模型的最大弯矩值,即$qb^2/8$;Q_h为横梁简化模型的最大剪力值,即$qb/2$;W_h为横梁截面抵抗矩;A_{wh}为横梁腹板面积.

3.4 栓钉连接件设计方法

横梁腹板采用栓钉连接件,按照设计原则,横梁腹板连接件所受剪力之和视为传递至横梁的全部荷载P_f,以此建立横梁腹板连接件计算方法.横梁上剪力连接件按平均受力计算,横梁上所需设置的连接件数量根据连接件的容许剪切力及所受剪切力之和进行计算[20]:

$$P_f = N_{req} \times Q_a \tag{13}$$

式中:N_{req}为抵抗相应剪切力的连接件所需数目;Q_a为栓钉剪力连接件的容许剪切力,取栓钉剪切强度.

横梁腹板连接件在距离横梁位置越近的部位受力越大,设计时认为能够有效承担剪力的连接件部位仅为横梁间距的1/4,如图20所示,以此确定栓钉连接件尺寸[21].为防止发生钢材与混凝土的剥离,应在纵梁下翼缘和腹板设置相应的连接件,理论上所需要设置的连接件数目为混凝土所承担的平均剪应力,根据有限元分析结果,按构造要求配置.

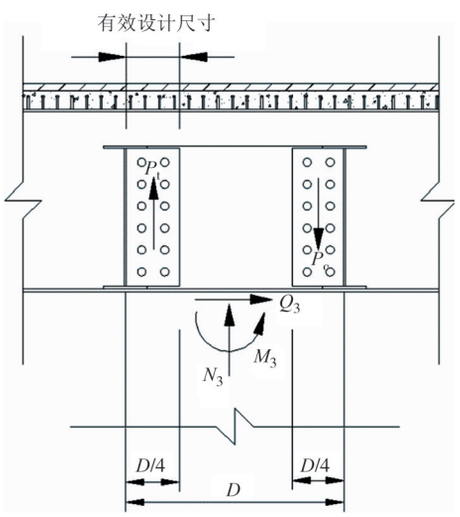


图20 栓钉连接件受力剖面图

Fig.20 Sectional diagram of stud connectors under stress

4 实桥试设计研究

4.1 总体布置

开展工字梁组合刚构桥试设计研究,以探索建立的墩梁节点传力机理和设计方法的工程可行性.试设计桥梁总体布置如图21所示.上部结构尺寸参照跨径布置为3×50 m的《装配化工字组合梁钢桥通用图》(JTG/T 3911—2021)[23],在三跨连续体系下取消支座设置,改为采用墩梁节点刚性连接,形成连续刚构体系.公路等级为一级公路,汽车荷载等级为公路-Ⅰ级,设计安全等级为一级,环境类别为Ⅰ类环境.主要设计参数:桥面双向四车道,纵梁采用3片工字组合梁,间距5.1 m.桥墩为钢筋混凝土矩形墩,墩高30 m,截面尺寸10.9 m×3 m,HRB400级钢筋,纵筋规格为Φ32,箍筋规格为Φ16.

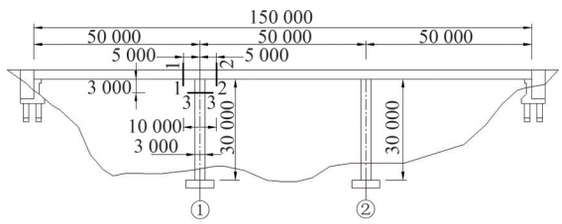


图21 试设计桥整体布置图(单位:mm)

Fig.21 Overall layout of the trial design bridge (unit: mm)

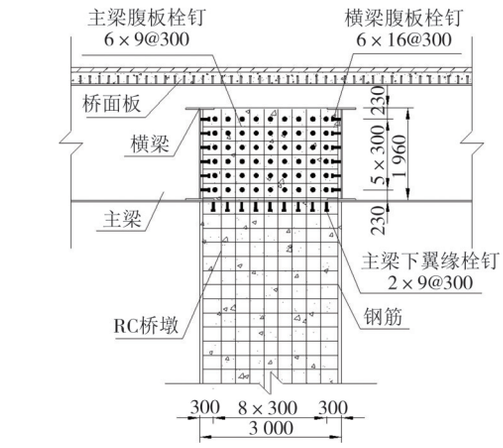
4.2 墩梁节点设计

墩梁节点构造如图22所示,纵梁在墩顶结构连续,与两道工字横梁在墩顶围成封闭箱形区域,分别在纵梁腹板内侧及下翼缘、横梁腹板内侧设置栓钉连接件,桥墩主钢筋延伸锚固于封闭区域中,不穿过纵梁下翼缘,结合部内按构造要求配置相应箍筋形成钢筋笼,最后在封闭区域内浇筑混凝土使墩梁固结形成整体.纵梁腹板上设置6×9阵列栓钉,横梁腹板范围内设置6×16阵列栓钉,栓钉规格Φ22×200 mm,间距300 mm.

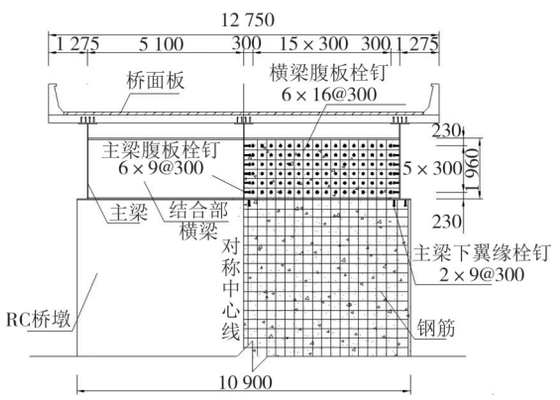
4.3 计算结果分析

墩梁节点局部模型截取考虑圣维南原理、模型运算体量、纵梁节段划分、负弯矩区分布情况及桥墩受拉区位置等,上部结构长度取墩顶中心线两侧各5 m,桥墩高度取距纵梁下翼缘距离3 m位置,试设计桥梁上部结构采用3片纵梁,车道荷载考虑偏心布置为不利情况,节点实体有限元模型如图23所示,边界荷载由全桥杆系有限元模型计算得到,汇总于表4.

计算得到传递至近偏荷载侧受拉区横梁和受压区横梁的作用力分别为-922.3 kN和4 367 kN,较理论公式计算值分别增大23.8%和2.4%;传递至远偏荷载侧受拉区横梁和受压区横梁的作用力分别为-424.9 kN和3 866 kN,较理论公式计算值分别降低43%和9.3%,说明横桥向单侧横梁传递的竖向荷载受偏心荷载影响,但受拉区横梁和受压区横梁的荷载传递占比总和变化较小,计算结果对比汇总于表5.结果表明,轴力和弯矩经由各传力路径的荷载传递占比基本不变,说明实桥计算中是否考虑纵梁桥面板作用,不影响墩梁节点的传力机制和内力分配,荷载传递占比计算方法能够适用于实桥的轴力、弯



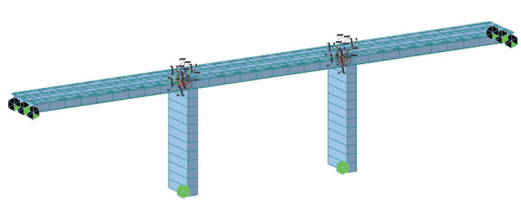
(a)立面图



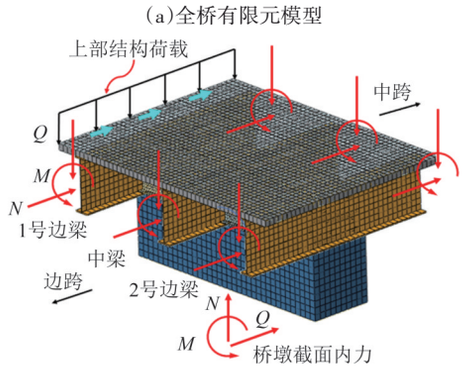
(b)截面图

图 22　墩梁节点构造示意图(单位:mm)

Fig.22　Schematic diagram of the structural form of pier-beam joint (unit: mm)



(a)全桥有限元模型



(b)墩梁节点实体有限元模型

图 23　墩梁节点荷载受力图示

Fig.23　Figure of the load bearing of pier-beam joint

矩荷载传递计算.

与轴力和弯矩传递相比,剪力传递无须考虑偏

表 4　墩梁节点模型局部荷载计算值

Tab.4　Calculation values of local load on pier-beam joint model

梁号	截面方向	轴力 N/kN	剪力 Q/kN	弯矩 M/(kN·m)
1号边梁	边跨(截面1-1)	−978.7	1 895.62	−18 857.01
	中跨(截面2-2)	−437.72	−1 840.13	−10 884.25
中梁	边跨(截面1-1)	95.77	2 502.66	−15 269.4
	中跨(截面2-2)	280.42	−1 771.3	−8 657.63
2号边梁	边跨(截面1-1)	−801.79	2 458.82	−12 812.07
	中跨(截面2-2)	−100.1	−1 319.08	−7 026.39

表 5　理论公式计算值与有限元模型计算值对比

Tab.5　Comparison between theoretical formula and finite element model calculation

横梁位置	理论公式计算值/kN	有限元模型计算值/kN	误差/%
受拉区横梁	−744.9	−729.3	2.1
受压区横梁	4 262.2	4 139	3.0

载影响,桥墩截面剪力经横梁传递的部分可由节点模型计算得到,无须建立计算公式.剪力作用下横梁荷载传递占比的公式计算结果与实桥有限元模型计算结果汇总于表6.相比于试验模型的墩梁节点,实桥模型的横梁对于桥墩截面剪力的荷载传递占比增幅为3.8%,由结合部及连接件分别传递至横梁的荷载比例未发生显著变化,说明剪力经各传力路径的荷载传递占比基本不变,荷载传递占比计算方法能够适用于实桥荷载工况下的剪力荷载传递.

表 6　实桥模型与试验模型的有限元计分析结果对比

Tab.6　Comparison of FE analysis results between real bridge model and experimental model

荷载	横梁两端剪力/kN	桥墩截面剪力/kN	横梁荷载传递占比/%
实桥模型	684.4	1 427.32	47.9
试验模型	88.2	200	44.1
误差	—	—	3.8

因此,实桥墩梁节点与试验模型的传递机制较为一致,各部件传力路径的荷载传递占比差幅较小,均可采用本文所述空间传力机制理论方法.但车道荷载偏心布置对横梁的传力和计算有影响,考虑车道偏心荷载导致的横桥向横梁受力差异,计算方法如下:

$$P_t = \eta \times \left(\frac{N_3}{2} - \frac{M_3}{D}\right) \times 55\%/(n-1) \tag{14}$$

$$P_c = \eta \times \left(\frac{N_3}{2} + \frac{M_3}{D}\right) \times 45\%/(n-1) \quad (15)$$

式中:η为车道荷载偏心布置对横梁受力的影响系数,根据计算结果,对于上部结构设计采用三纵梁形式的工字梁组合刚构桥,建议取1.2.

纵梁验算以车道荷载偏心侧截面内力值最大的纵梁展开.采用理论公式计算结果与有限元计算结果对比如表7所示.试设计桥墩梁节点部位的纵梁尺寸验算结果满足要求,其中理论公式计算应力值较有限元计算值略高,且与材料容许应力之间存在较大的安全储备,组合应力系数小于安全系数,说明本文的纵梁设计计算方法具备可行性.

表7 试设计桥墩梁节点的纵梁应力验算结果

Tab.7 Stress calculation results of longitudinal beam of pier-beam joint of trial design bridge

应力	公式计算值/MPa	有限元值/MPa	差幅/%	材料容许应力/MPa	组合应力系数
正应力	216.2	205.3	5.3	420	0.96
剪应力	195.2	181.6	7.5	420	

横梁验算结果对比如表8所示.试设计桥墩梁节点部位的横梁尺寸验算结果满足要求,公式计算应力值大于有限元计算值,小于材料容许应力值,说明将横梁视为简支梁设计的简化模型,不仅可以简化设计方法,也能够确保横梁构造应力值与材料容许应力值之间有一定安全储备.

表8 试设计桥墩梁节点的横梁应力验算结果

Tab.8 Stress calculation results of transverse beam of pier-beam joint of trial design bridge

应力	公式计算值/MPa	有限元值/MPa	差幅/%	材料容许应力/MPa
正应力	120.5	108.8	10.8	420
剪应力	225.2	217.1	3.7	420

按照设计原则,横梁腹板剪力连接件承担所有传递至横梁的荷载,将上述横梁荷载验算条件代入式(13),算得栓钉所需个数为81,试设计桥梁栓钉数量为192.试设计桥墩梁节点横梁腹板连接件的数目设置符合承载力要求.

5 结 论

1)墩梁节点的传力理论分析表明,墩梁节点荷载传力路径包括纵梁和横梁两部分,弯矩可分解为与轴力同向的等效线性荷载,其受压侧与受拉侧的传递机制及传力路径分别与轴压力和轴拉力相同,剪力的传递机制区别于弯矩和轴力.

2)对比有限元模型计算与试验结果,验证了墩梁节点实体有限元建模方法的正确性,建立栓钉实体单元并模拟栓钉-混凝土接触关系的布尔运算法及嵌入单元法均能够准确地模拟墩梁节点宏观力学性能和钢混结合部细部构造的受力特性.布尔运算法的计算精度和准确性较高,适用于小尺寸的试验构件模拟;嵌入单元法的运算效率较高,适用于实桥模型计算.

3)传力路径的荷载承担比例分析表明,纵梁与横梁各承担45%~55%的轴力、弯矩和剪力传递,轴压力和轴拉力作用下纵梁的荷载承担占比有所变化,直接由纵梁传递的荷载主要通过纵梁下翼缘传递,传递至横梁的荷载主要由横梁腹板栓钉承担.

4)建立墩梁节点设计方法,横梁栓钉连接件承担所有传递至横梁的荷载;在受拉侧横梁承担55%荷载传递,受压侧横梁承担45%荷载传递;横梁视作受到均匀分布荷载作用的简支梁进行设计;横梁设计需要考虑车道荷载的横桥向偏心影响系数;纵梁在墩梁节点部位的验算需考虑桥墩的附加应力;按构造要求设置纵梁腹板栓钉及下翼缘栓钉.

5)实桥设计结果表明,车道荷载的偏心布置会导致横桥上不同横梁间的受力差异,但不影响各传力路径的荷载传递占比.对试设计桥梁墩梁节点进行理论计算值与有限元计算结果对比,验算满足要求.建立的墩梁节点计算方法可适用于上部结构采用多主梁的组合刚构桥设计.

参考文献

[1] 饶建雄.高墩大跨连续刚构桥抗震设计研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015:4-5.
RAO J X. Study on seismic design of long-span continuous rigid frame bridge with high pier [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology,2015:4-5. (in Chinese)

[2] 宗周红,夏坚,徐绰然.桥梁高墩抗震研究现状及展望[J].东南大学学报(自然科学版),2013,43(2):445-452.
ZONG Z H,XIA J,XU C R. Seismic study of high piers of large-span bridges:an overview and research development[J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition),2013,43(2):445-452.(in Chinese)

[3] 姚昌荣,李亚东,梁东,等. 山区大跨度桥梁结构选型[J]. 桥梁建设,2012,42(6):81-86.
YAO C R,LI Y D,LIANG D,et al. Structural type selection for

long span bridges in mountainous region[J]. Bridge Construction, 2012,42(6):81-86.(in Chinese)

[4] 易辉. 山区高墩曲线连续刚构桥设计探讨[J]. 公路交通技术,2015,31(6):51-54.
YI H. Probe into design of high-pier curve continuous steel structure bridges in mountainous area[J]. Technology of Highway and Transport,2015,31(6):51-54.(in Chinese)

[5] 陆晓锦. 钢箱-砼组合连续刚构桥的钢箱梁设计原理研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2012.
LU X J. Study on design principle of steel box girder of steel box-concrete composite continuous rigid frame bridge[D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2012.(in Chinese)

[6] 高田. 装配式钢桁-混凝土组合连续刚构桥桥道板研究[D]. 重庆:重庆交通大学,2013:14-16.
GAO T. Study on bridge deck of assembled steel truss-concrete composite continuous rigid frame bridge [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University,2013:14-16. (in Chinese)

[7] ELREMAILY A, AZIZINAMINI A. Design provisions for connections between steel beams and concrete filled tube columns [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57 (9): 971-995.

[8] TAKESHI Y, KATSU N, BUNKICHI H. Two-girder rigid frame bridge combining girders and RC pier[R]. Kobe: Kobe Steel Ltd, 2003,53(1):166-174.

[9] NAKAMURA S I, MOMIYAMA Y, HOSAKA T, et al. New technologies of steel/concrete composite bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research,2002,58(1): 99-130.

[10] 白玲.超静定组合结构桥梁受力特性的3D-FEM模拟分析[D]. 北京:铁道部科学研究院,2003:47-49.
BAI L. 3D-FEM simulation analysis of mechanical characteristics of statically indeterminate composite bridge[D]. Beijing: China Academy of Railway Sciences,2003:47-49.(in Chinese)

[11] 白玲,史永吉.超静定组合结构桥梁受力特性的3D-FEM模拟分析[J]. 中国铁道科学,2003,24(6):134-137.
BAI L, SHI Y J. 3D-FEM simulation analysis of mechanical characteristics of statically indeterminate composite bridge [J]. China Railway Science,2003, 24(6): 134-137.(in Chinese)

[12] 宋晓宇, 白玲. 铁路连续复合刚构桥墩梁刚性节点的受力分析[J]. 北京交通大学学报,2011, 35(3):77-80.
SONG X Y, BAI L. Mechanical characteristics analysis of pier-girder rigid node of continuous hybrid rigid frame railway bridge [J]. Journal of Beijing Jiaotong University, 2011, 35(3): 77-80.(in Chinese)

[13] BAMRUNGWONG C, MACHIDA A, NAGATANI T, et al. 3 167 finite element analysis of steel girder-concrete pier rigid connection [J]. Transactions of the Japan Concrete Institute, 2000,22:331-336.

[14] SATO T, SHIMIZU I, OTA T, et al. A proposal on design method for rigid section of hybrid rigid-frame bridge[J]. Japanese Journal of Structural Engineering 1999,45(A):1431-1438.

[15] FUJIWARA Y, HOSAKA T, HAYASHIKAWA T, et al. Analytical study on load capacity performance of the connection using anchor-beam structure between steel-box-girder and RC pier[J]. Japanese Journal of Structural Engineering. 2008,54(A): 786-797.

[16] MINAKAWA M, TAKASHIMA Y, IKEDA K. Experimental study on rigid connection for hybrid rigid frame bridge with a three-sided steel box girder[J]. Japanese Journal of Hokkaido Structural Development, 2003,607:10-17.

[17] SASAKI Y, HIRAI T, AKEHASHI K. Experimental study on rigid connection for hybrid frame bridge consisting of steel girder and reinforced concrete pier [J]. Japanese Journal of Structural Engineering. 1998,44(A):1448-1457.

[18] LIU Y Q, HIKOSAKA H, HUANG L. Finite element analysis of steel girder-to-column connection considering nonlinear behavior of studs[J]. Journal of Applied Mechanics,1998,1:481-488.

[19] 鋼橋技術研究会鋼コンクリート複合構造部会. 複合ラーメン橋の剛結部の実例に基づいた設計資料[R]. 东京:鋼橋技術研究会,2009:15-16.
Steel concrete composite structure subcommittee of Steel bridge technology research institute. Design data base of rigid joint of composite rigid frame bridge[R]. Tokyo: Steel bridge technology research institute,2009:15-16.(in Japanese)

[20] 日本橋梁建設協会. 合理化橋梁設計注意点及验证算例[M]. 东京:日本橋梁建設協会,2009:110-111.
Japan Bridge Construction Association. Reasonable bridge design considerations and verification examples[M]. Tokyo: Japan Bridge Construction Association,2009:110-111.(in Japanese)

[21] 日本高速道路株式会社. 設計要領 第二集 橋梁建設编[M]. 东京:高速道路総合技術研究所,2013:5-6.
Japan Expressway Co., Ltd. Design essentials episode 2 bridge construction compilation [M]. Tokyo: High speed Road Joint Technology Research Institute,2013:5-6.(in Japanese)

[22] 公路钢结构桥梁设计规范:JTG D64—2015[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2015.
Specification for design of highway steel bridge: JTG D64—2015 [S]. Beijing: China Communications Press Co., Ltd, 2015.(in Chinese)

[23] 装配化工字组合梁钢桥通用图:JTG/T 3911—2021[S]. 北京:人民交通出版社股份有限公司,2022.
General drawing of prefabricated I-type composite beam bridge: JTG/T 3911—2021 [S]. Beijing: China Communications Press Co.,Ltd,2022.(in Chinese)