

引用本文:刘永健,吴浩伟,封博文,等. 车轮荷载作用下双工字钢组合梁桥横桥向焊钉拉拔效应[J]. 建筑科学与工程学报,2020,37(2):1-10.
LIU Yong-jian, WU Hao-wei, FENG Bo-wen, et al. Tensile Effect of Welding Studs in Transverse Direction of Twin-I Steel Composite Girder Bridge Under Wheel Load[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(2): 1-10.

DOI:10.19815/j.jace.2019.09032

车轮荷载作用下双工字钢组合梁桥横桥向焊钉拉拔效应

刘永健, 吴浩伟, 封博文, 张泽军, 陆力伟

(长安大学 公路学院, 陕西 西安 710064)

摘要:针对双工字钢组合梁在车轮荷载作用下引起的钢混界面横桥向掀起效应导致焊钉出现拉拔应力的问题展开讨论,为分析此效应对双工字钢组合梁焊钉受力的影响从而为焊钉布置提供参考,对 2×35 m 双工字钢组合连续梁的焊钉拉拔应力分布规律及影响因素进行了研究。分析了6种采用不同单元类型、焊钉模拟方式、接触关系的 ABAQUS 有限元模型组合梁钢混界面横桥向掀起效应计算结果,通过对比已有文献中的试验结果,确定了合理的有限元模拟方法。基于此方法,分析了车轮荷载作用位置、加劲肋与横梁设置形式对焊钉拉拔应力沿纵横桥向分布的影响;研究了横梁位置、桥面板厚度与主梁间距比、焊钉横桥向间距对焊钉拉拔应力的影响并讨论了焊钉拉拔应力对各参数的敏感性。结果表明:加劲肋限制了钢梁上翼缘随桥面板变形,导致焊钉产生明显拉拔应力;焊钉应力沿纵桥向衰减速度很快;设置横梁能减小双工字钢组合梁的侧向变形,导致焊钉拉拔应力大幅提高,最多能提高317.97%;焊钉拉拔应力随着桥面板厚度与主梁间距比增大而逐渐减小,随着横梁中心线距钢梁上翼缘距离的增大呈现出先增大、后不变、最后略微减小的趋势,随焊钉横桥向间距增大出现先增大后减小的现象;各参数中,桥面板厚度与主梁间距比对焊钉拉拔应力数值的影响最为显著;根据焊钉拉拔应力分布规律及影响因素,建议应适当加密双工字钢组合梁加劲肋与横梁附近的焊钉。

关键词:桥梁工程;焊钉拉拔应力;数值模拟;双工字钢组合梁桥;集束式焊钉

中图分类号: TU311

文献标志码: A

文章编号: 1673-2049(2020)02-0001-10

Tensile Effect of Welding Studs in Transverse Direction of Twin-I Steel Composite Girder Bridge Under Wheel Load

LIU Yong-jian, WU Hao-wei, FENG Bo-wen, ZHANG Ze-jun, LU Li-wei

(School of Highway, Chang'an University, Xi'an 710064, Shaanxi, China)

Abstract: In view of the tensile stress of the studs caused by the transverse bridge lifting effect of the steel-concrete interface of the twin-I steel composite girder under the wheel load, in order to analyze the effect on the stress of the welding studs of the twin-I steel composite girder and provide a reference for the arrangement of the welding studs, the stud tensile stress distribution law and influencing factors of 2×35 m twin-I steel composite continuous girder were studied. The

收稿日期: 2019-09-18

基金项目: 陕西省交通运输厅科研项目(17-14K)

作者简介: 刘永健(1966-),男,江西玉山人,教授,博士研究生导师,工学博士, E-mail: lyj_chd@gmail.com。

calculation results of transverse bridge lifting effect of steel-concrete interface of composite girder based on six kinds of ABAQUS finite element models with different element types, weld stud simulation methods and contact relations were analyzed. By comparing the test results in the existing literature, a reasonable finite element simulation method was determined. Based on the method, the influences of wheel load position, stiffener and crossbeam setting on the distribution of stud tensile stress along the longitudinal and transverse bridge directions were analyzed. The influences of girder position, the ratio of the thickness of bridge deck to the distance between main girders, and the transverse bridge distance between welding studs on the tensile stress of welding studs were studied, and the sensitivity of tensile stress of welding studs to various parameters was discussed. The results show that the stiffener limits the deformation of the upper flange of the steel girder along with the bridge deck, which leads to the obvious tensile stress of the welding stud. The stress of welding stud decreases rapidly along the longitudinal direction of bridge. The setting of crossbeam can reduce the lateral deformation of twin-I steel composite girder, which leads to a great increase of stud tensile stress, up to 317.97%. With the increase of the ratio between the thickness of bridge deck and the distance between main girders, the tensile stress of welding stud decreases gradually. With the increase of the distance between the center line of girder and the upper flange of steel girder, the tensile stress increases firstly and then does not change, and finally decreases slightly. With the increase of the transverse distance between welding studs, the tensile stress increases firstly and then decreases. Among the parameters, the ratio of deck thickness to girder spacing has the most significant effect on the value of stud tensile stress. According to the distribution of tensile stress and its influencing factors, it is suggested that the welding studs near the stiffener and girder of twin-I steel composite girder should be properly densified.

Key words: bridge engineering; tensile stress of welding stud; numerical simulation; twin-I steel composite girder bridge; group welding stud

0 引言

双工字钢组合梁桥具有工业化程度高、质量可控性强、构造简单、经济性高、施工高效等诸多优点^[1-2],在法国等欧洲国家已有较多实践,2016年中国在安徽济祁高速公路淮河桥对这种桥型进行了首次应用^[3]。

相比于多主梁,双工字钢组合梁桥的主梁间距大,桥面板悬臂长度长,在车轮荷载作用下,组合梁横向弯曲效应明显,在钢梁上翼缘跟随桥面板变形受到约束时,组合梁界面会发生横桥向掀起现象,焊钉产生较大的拉拔应力。在车轮的反复加载下,焊钉处于周期性剪拔共同作用的复杂应力状态,降低焊钉使用寿命,影响组合梁桥使用年限^[4-6]。现行的《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)^[7]规定,当相邻主梁间距较大时,钢混界面可能会有较大的拉拔力,应在连接件设计时给予重视。因此,有必要对车轮荷载作用下,双工字钢组合梁桥由于钢混

界面横桥向掀起引起的焊钉拉拔应力分布规律及影响因素进行研究。

现有文献集中在组合箱梁桥的焊钉横桥向拉拔效应研究。张俊平等^[8]进行了大悬臂钢混结合梁节段模型试验,对钢混组合箱梁焊钉拉拔力大小与分布规律进行研究;邵长宇^[9]以上海长江大桥为工程背景,基于局部模型试验与有限元数值模拟方法对均布式焊钉组合箱梁的拉拔力进行研究,发现当焊钉布置位置接近腹板加劲肋时,横向掀起位移大幅减小,反之则大幅增加,但腹板加劲肋附近焊钉将承受较大的拉拔力,建议焊钉布置应兼顾掀起位移与焊钉拉拔力;侯健等^[10]采用有限元数值模拟方法,对集束式焊钉组合箱梁在恒载和汽车偏载作用下钢混界面的横桥向掀起现象进行分析,认为采用集束式焊钉布置能有效防止组合梁钢混界面横桥向掀起现象,钢混界面的横桥向掀起位移十分小;周辉^[11]基于 ANSYS 软件,对偏心荷载作用下简支与连续组合钢箱梁界面滑移效应与掀起效应的关系进行

了研究,认为滑移效应与掀起效应相互影响。双工字钢组合梁属于开口截面,扭转刚度较小,在荷载作用位置横梁布置方式会对钢梁侧向变形产生影响,进而影响焊钉拉拔应力,组合箱梁的研究成果不能完全解决双工字钢组合梁焊钉拉拔效应的问题。

为此,本文采用有限元软件,以 $2\times 35\text{ m}$ 连续双工字钢组合梁为研究对象,对不同荷载作用位置、加劲肋与横梁布置方式时焊钉拉拔应力的分布规律进行研究,并对桥面板厚度与主梁间距比、横梁位置、焊钉间距对焊钉拉拔应力的影响以及各参数敏感性进行分析。

1 计算模型与分析方法

1.1 模型设计

$2\times 35\text{ m}$ 连续双工字钢组合梁桥布置如图 1,2 所示。桥梁全长 70 m ,计算跨径 34.07 m 。各部件尺寸及材料如表 1 所示。

组合梁主梁高 2.2 m ,钢梁的梁高 H 为 1.8 m ,间距 L 为 6.7 m ,桥面板宽 12.75 m ,钢梁之间桥面

板厚度 h 为 270 mm 。支座附近 10.5 m 范围加劲肋间距为 1.75 m ,跨中 14 m 范围内加劲肋间距为 3.5 m ,横梁间距为 3.5 m 。A-A 截面主梁间设置 1 道工字形小横梁,横梁中心线距钢梁上翼缘距离 Z 为 800 mm ,钢梁内侧设置 T 型加劲肋,外侧无加劲肋。桥面板与钢梁采用集束式焊钉相连,焊钉长 200 mm ,直径为 25 mm ,剪力槽中心间距为 1.125 m ,荷载作用位置剪力槽内的 B 处焊钉布置如图 3 所示。原设计中焊钉横桥向间距 d_1 为 120 mm 。

加劲肋限制了钢梁翼缘跟随桥面板变形,导致焊钉产生拉拔应力。横梁的设置限制了钢梁侧向变形,一定程度上限制了钢梁翼缘跟随桥面板变形,对焊钉拉拔应力产生较大影响,同时焊钉拉拔应力沿横桥向分布还受到荷载作用位置影响。根据横梁与加劲肋设置情况以及车轮荷载沿横桥向布置位置分为 12 个工况,对焊钉拉拔应力的大小及分布进行研究,工况具体加载与构造如表 2 所示。车轮荷载大小(1 个后车轮轴重)按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)^[12] 确定,每个车轮荷载大小 70

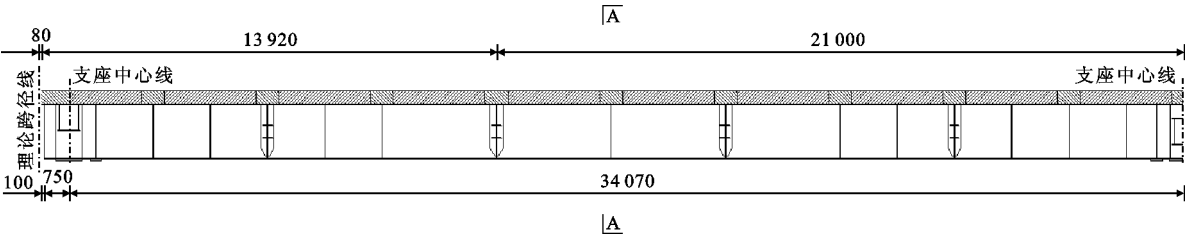


图 1 双工字钢组合梁立面布置 (单位: mm)

Fig. 1 Elevation Arrangement of Twin-I Steel Composite Girder (Unit: mm)

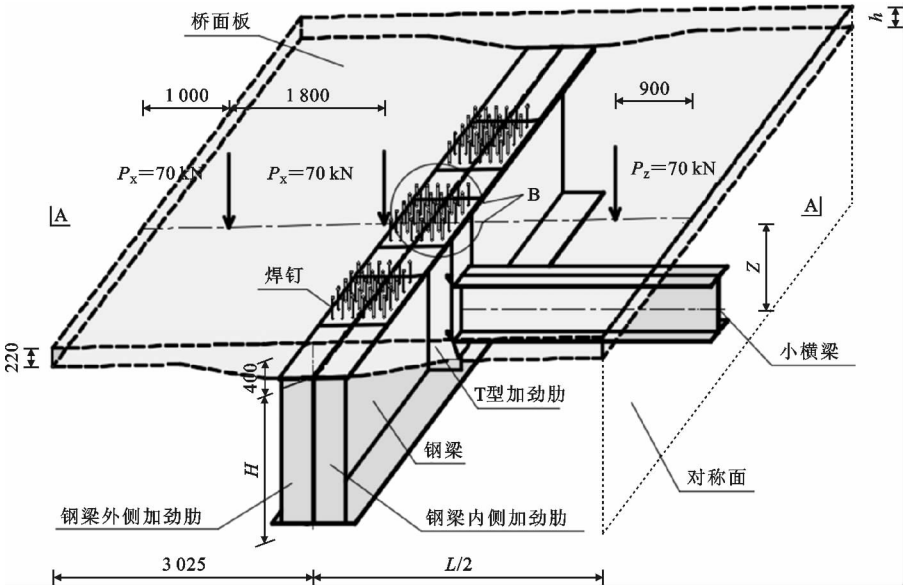


图 2 双工字钢组合梁尺寸及荷载布置 (单位: mm)

Fig. 2 Size and Load Arrangement of Twin-I Steel Composite Girder (Unit: mm)

表 1 组合梁各部件尺寸及材料

Tab.1 Size and Material of Composite Girder

位置	构件	尺寸	材料
桥面板	悬臂端板	220 mm(厚度)	C50
	钢梁之间板	270 mm(厚度)	
	承托处板	400 mm(厚度)	
钢梁	上翼缘	800 mm×28 mm	Q345
	腹板	1 718 mm×20 mm	
	下翼缘	960 mm×54 mm	
小横梁	上翼缘	300 mm×20 mm	Q345
	腹板	360 mm×16 mm	
	下翼缘	300 mm×20 mm	
加劲肋		1 718 mm×350 mm×20 mm	Q345
T 型加劲肋	腹板	1 718 mm×350 mm×20 mm	Q345
	翼板	1 650 mm×400 mm×20 mm	Q345
桥面板钢筋		Φ28 mm	HRB400
焊钉		200Φ25 mm	ML15

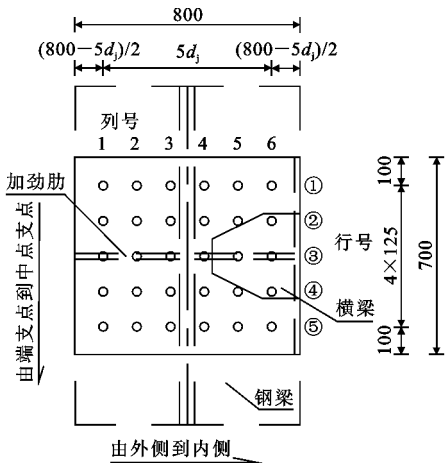


图 3 组合梁 B 处焊钉布置(单位:mm)

Fig.3 Welding Studs Arrangement of Composite Girder at Position B (Unit:mm)

表 2 不同荷载工况下组合梁加劲肋与小横梁设置情况

Tab.2 Setting Condition of Stiffener and Floor Girder of Composite Girder Under Different Load Conditions

小横梁	钢梁内侧加劲肋	钢梁外侧加劲肋	横桥向荷载位置	工况编号	最大拉拔应力的焊钉编号	最大拉拔应力/MPa
设置	设置	不设置	梁间荷载	原设计	33	21.86
设置	设置	不设置	悬臂端荷载		36	87.10
不设置	不设置	不设置	梁间荷载	L-1	33	0.34
	不设置	设置		L-2	31	40.11
	设置	不设置		L-3	33	5.23
	设置	设置		L-4	31	25.33
	不设置	不设置	悬臂端荷载	X-1	33	1.60
	不设置	设置		X-2	31	-20.13
	设置	不设置		X-3	36	53.06
	设置	设置		X-4	36	24.43
设置	设置	不设置	梁间荷载	L-5	33	21.86
	设置	设置		L-6	31	53.72
	设置	不设置	悬臂端荷载	X-5	36	87.10
	设置	设置		X-6	36	57.90

注:以纵桥向为行,横桥向为列,编号时先行后列,如 51 号焊钉表示第 5 行第 1 列焊钉;负值代表焊钉受压。

kN。车轮荷载沿纵桥向作用于 A-A 截面,荷载作用位置如图 1 所示;横桥向车轮荷载按梁间荷载 P_z 和悬臂端荷载 P_x 两种方式布置,梁间荷载 P_z 横向布置位置是将双工字钢组合梁桥面板简化为简支梁后,根据简支梁弯矩影响线的最不利位置确定,悬臂端荷载 P_x 横向位置是按《公路桥涵设计通用规范》(JTG D60—2015)所容许的车轮距桥面板自由端最近距离确定,具体布置如图 2 所示。

焊钉拉拔应力由于桥面板横向弯曲产生,主梁间桥面板厚度 h 与钢主梁间距 L 的比值对桥面板横向弯曲有较大的影响,将主梁间桥面板厚度 h 与钢主梁间距 L 的比值定义为参数 k_1 。分析最不利工况下 k_1 对焊钉拉拔应力的影响, k_1 研究范围为

0.03~0.07。

横梁位置的改变对其限制双工字钢组合梁侧向变形产生影响,钢梁翼缘跟随桥面板变形随之发生变化,进而对焊钉拉拔应力产生影响,因此以横梁中心线距钢梁上翼缘顶面距离 Z 与钢梁高度 H 的比值 k_2 为研究参数,分析最不利工况下横梁设置位置对焊钉拉拔应力的影响, k_2 取值如表 3 所示。

焊钉拉拔应力还与横桥向间距 d_1 有关,根据现行的《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)确定焊钉横向间距为 70~110 mm,研究最不利工况下焊钉横桥向间距变化对焊钉拉拔应力的影响。

1.2 分析方法

选用文献[9]组合梁桥焊钉拉拔效应试验中试

表 3 横梁位置与对应的 k_2

Tab. 3 Position of Floor Girder and Corresponding k_2

横梁中心线距钢梁上翼缘距离 Z/mm	钢梁高度 H/mm	k_2
300	1 800	1/6
600	1 800	1/3
900	1 800	1/2
1 200	1 800	2/3
1 500	1 800	5/6

件 ML-1,在 70 kN 荷载下钢混界面掀起位移沿纵横桥向的分布及由拉拔力引起的焊钉最大轴向应变,对不同模拟方式进行对比验证。本文研究组合梁在弹性受力范围内的焊钉拉拔效应,因此材料只考虑其弹性力学性能,钢材 Q345 弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.31;桥面板 C60 混凝土材料弹性模量为 3.60×10^4 MPa,泊松比为 0.2。基于 ABAQUS 的有限元试验模型如图 4 所示。对比了 6 种不同的组合梁模拟方式,各方法的单元选取、焊钉模拟方式、桥面板与钢梁界面模拟以及焊钉与混凝土桥面板接触关系如表 4 所示,其中桥面板与钢梁的库仑摩擦因子取 0.3^[13-18]。

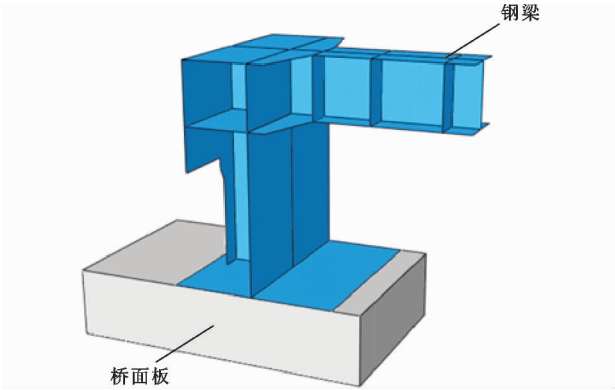


图 4 试件 ML-1 有限元模型

Fig. 4 Finite Element Model of Specimen ML-1

当焊钉采用弹簧单元模拟^[19-20]时,设置纵横桥向的切向刚度及轴向刚度。按《公路钢混组合梁桥设计与施工规范》(JTG/TD64-01—2015)^[14]计算

表 4 焊钉与界面模拟方式

Tab. 4 Simulation Mode of Welding Studs and Interface

模拟方式编号	桥面板单元类型	钢梁单元类型	焊钉模拟方式	焊钉与桥面板接触关系	桥面板与钢梁接触关系
1	C3D8R	S4R	弹簧		库仑摩擦+硬接触
2	C3D8	S4	弹簧		库仑摩擦+硬接触
3	C3D8R	S4R	C3D8R	库仑摩擦+硬接触	库仑摩擦+硬接触
4	C3D8	S4	C3D8R	库仑摩擦+硬接触	库仑摩擦+硬接触
5	C3D8R	S4R	C3D8R	内置	库仑摩擦+硬接触
6	C3D8	S4	C3D8R	内置	库仑摩擦+硬接触

注: C3D8R 为 8 节点六面体线性缩减积分单元; C3D8 为 8 节点六面体线性完全积分单元; S4R 为 4 节点四边形有限薄膜应变线性缩减积分壳单元; S4 为 4 节点四边形有限薄膜应变线性完全积分壳单元。

抗剪刚度,即

$$k_{ss}=13.0d_{ss}\sqrt{E_c f_{ck}}$$

(1)

式中: k_{ss} 为焊钉的抗剪刚度; d_{ss} 为焊钉杆部直径; E_c 为混凝土弹性模量; f_{ck} 为混凝土抗压强度标准值。

轴向刚度 K_v 按轴心受拉理论公式(2)计算^[21]

$$K_v=E_{st}A_{st}/l$$

(2)

式中: K_v 为焊钉轴向刚度; E_{st} 为焊钉弹性模量; A_{st} 为焊钉的截面面积; l 为焊钉的长度。

当焊钉采用实体单元时,焊钉与钢梁采用绑定(Tie)接触,焊钉与桥面板的接触关系分 2 类,一类是在桥面板内开出焊钉形状^[22-24],焊钉与桥面板间采用硬接触,模拟受压时焊钉与混凝土桥面板接触却不穿透,同时焊钉与桥面板间设置罚函数,摩擦因数取 0.3,模拟焊钉与混凝土之间的摩擦;另一类是将焊钉内置(Embedded Region)到桥面板中。

有限元计算得到的横桥向掀起位移沿纵桥向和横桥向的分布与文献[9]实测结果对比如图 5 所示。模拟方式 5 与模拟方式 6 有限元曲线与试验曲线基本吻合;对比由于界面横桥向掀起引起的焊钉最大轴向应变,文献中的试验值为 $1\,685\times10^{-6}$,模拟方式 5 计算得到的焊钉最大轴向应变为 $1\,541\times10^{-6}$,与试验值相对误差为 8.55%;模拟方式 6 计算得到的焊钉最大轴向应变为 $1\,346\times10^{-6}$,与试验值相对误差为 20.12%。综合计算精度与计算效率,推荐采用模拟方式 5 模拟双工字钢组合梁有限元模型。

2×35 m 连续双工字钢组合梁模型如图 6 所示,为简化模型计算量,根据文献[9]中集束式焊钉组合箱梁界面横桥向掀起效应沿纵桥向的分布范围约为 0.3 m 的结论,对荷载作用点和作用点左右相邻的剪力槽内的焊钉采用实体单元模拟,其余剪力槽内的焊钉选用弹簧单元模拟。

双工字钢组合梁钢材 Q345 的弹性模量为 2.06×10^5 MPa,泊松比为 0.31;桥面板 C50 混凝土的弹性模量为 3.45×10^4 MPa,泊松比为 0.2。考虑钢筋对

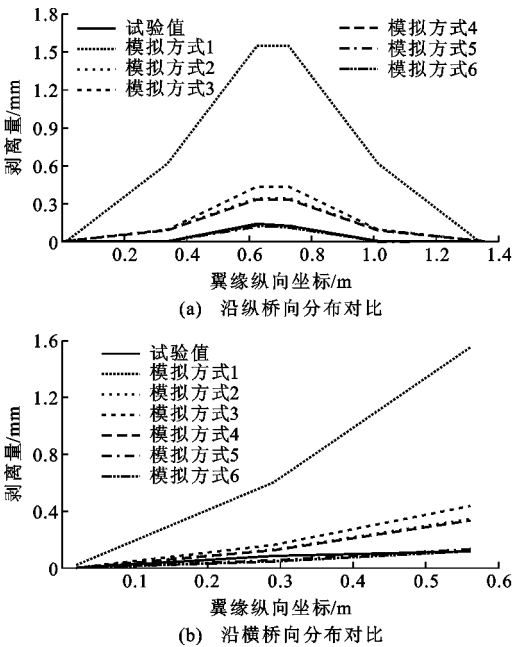


图 5 有限元结果与文献[9]实测结果对比
Fig. 5 Comparison of Finite Element Results and Measured Results in Literature [9]

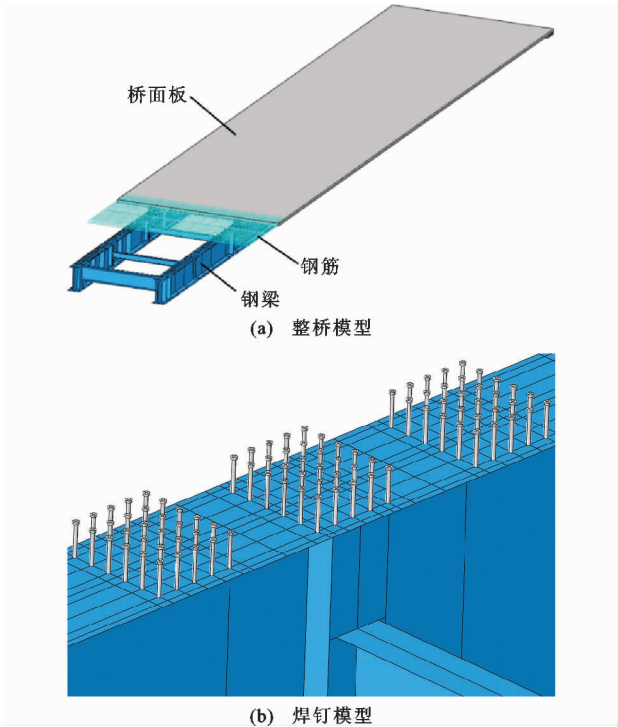


图 6 双工字钢组合梁有限元模型
Fig. 6 Finite Element Model of Twin-I Steel Composite Girder

桥面板刚度的贡献,组合梁模型中桥面板钢筋采用 T3D2 单元进行模拟,钢筋弹性模量取 2.0×10^5 MPa,泊松比取 0.3,钢筋内置(Embedded Region)于混凝土桥面板内。

2 焊钉拉拔应力沿纵桥和横桥向分布规律

2.1 焊钉拉拔应力沿横桥向分布规律

2.1.1 加劲肋设置的影响

组合梁焊钉拉拔应力 T 沿横桥向分布如图 7 所示。当车轮荷载作用位置钢梁内外侧均无加劲肋(工况 L-1 和工况 X-1)时,焊钉无明显拉拔应力,而其余设置加劲肋的荷载工况,只有在上翼缘下方设置加劲肋的焊钉出现轴向应力,说明只有当焊钉所在的钢梁上翼缘随桥面板变形受到加劲肋限制时,焊钉才会出现轴向应力。

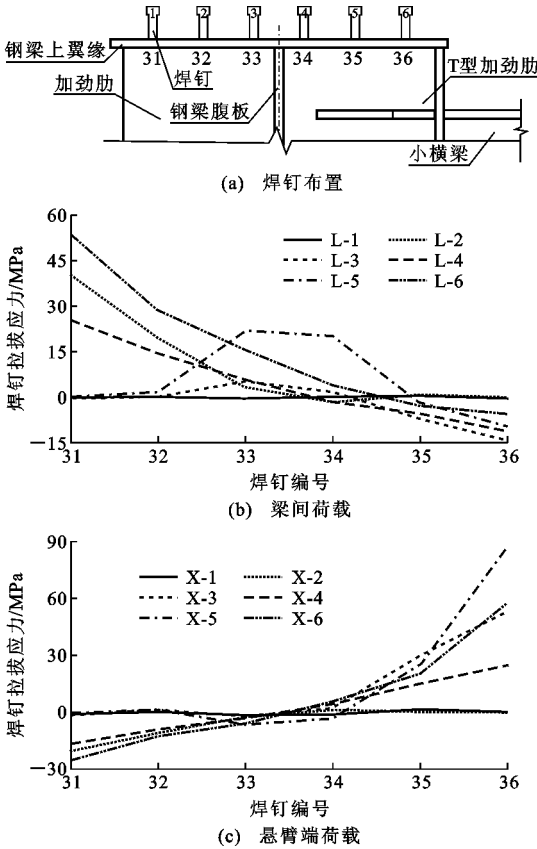


图 7 T 沿横桥向分布
Fig. 7 T Distribution Along Transverse Direction of Bridge

若车轮荷载作用位置钢梁内外侧只设置 1 片加劲肋,则焊钉拉拔应力沿横桥向分布和数值因荷载作用位置与加劲肋设置位置的不同而不同。梁间荷载作用下,只在外侧设置加劲肋钢梁(工况 L-2)的焊钉拉拔应力峰值出现在钢梁外侧翼缘附近;只在钢梁内侧设置加劲肋(工况 L-3)的焊钉拉拔应力峰值出现在钢梁腹板位置,由于只在内侧设置加劲肋焊钉拉拔力臂小于在外侧设置加劲肋焊钉拉拔力

力臂,因此在梁间荷载作用下内侧设置加劲肋(工况 L-3)的焊钉拉拔应力小于外侧设置加劲肋(工况 L-2)的焊钉拉拔应力,如表 2 所示。悬臂端荷载作用下,车轮荷载位于钢梁外侧上翼缘位置,当只在钢梁外侧设加劲肋(工况 X-2)时,所有焊钉处于受压状态,最大焊钉压应力峰值出现在钢梁上翼缘外侧位置;当只在钢梁内侧设置加劲肋时(工况 X-3),焊钉出现拉拔应力,焊钉拉拔应力峰值出现在钢梁上翼缘内侧。

车轮荷载作用位置钢梁内外侧均设置加劲肋(工况 L-4 和工况 X-4)时,焊钉拉拔应力沿横桥向近似线性分布。内外侧均设置加劲肋焊钉拉拔应力(工况 L-4 和工况 X-4)峰值出现位置与只在远离荷载作用翼缘下方设置加劲肋的焊钉拉拔应力(工况 L-2 和工况 X-3)峰值出现位置相同。荷载作用位置下方无加劲肋支承时,桥面板变形更明显,只在远离荷载作用翼缘下方设置加劲肋的焊钉拉拔应力(工况 L-2 和工况 X-3)峰值大于内外侧均设置加劲肋的焊钉拉拔应力(工况 L-4 和工况 X-4)峰值。

2.1.2 横梁设置的影响

从图 7 组合梁焊钉拉拔应力 T 沿横桥向分布可以看出,荷载作用位置有无横梁对拉拔应力沿横桥向分布无明显影响,但横梁的设置使组合梁焊钉拉拔应力大幅增加。从表 2 中焊钉最大拉拔应力对比中可以发现:工况 L-5 的焊钉最大拉拔应力比工况 L-3 大 317.97%,工况 L-6 的焊钉最大拉拔应力比工况 L-4 大 112.08%;工况 X-5 的焊钉最大拉拔应力比工况 X-3 大 64.15%,工况 X-6 的焊钉最大拉拔应力比工况 X-4 大 137%,说明在同样的荷载布置与加劲肋设置条件下,荷载作用位置设置横梁提高了钢梁的抗扭刚度,钢梁翼缘随桥面板变形受限,使得焊钉拉拔应力幅度增加。梁间荷载作用下工况 L-6 的焊钉最大拉拔应力大于梁间荷载作用下其他工况焊钉最大拉拔应力,悬臂端荷载作用下工况 X-5 的焊钉最大拉拔应力大于悬臂端荷载作用下其他工况焊钉最大拉拔应力,因此以梁间荷载作用下工况 L-6 与悬臂端荷载作用下工况 X-5 为 2 种加载模式下的最不利工况。

2.2 焊钉拉拔应力沿纵桥向分布规律

焊钉拉拔应力 T 沿纵桥向分布如图 8 所示,沿纵桥向荷载作用位置剪力槽内的焊钉拉拔应力最大。焊钉拉拔应力随着离荷载距离的增大而减小,并且焊钉拉拔应力沿纵桥向的衰减速度很快,距荷载作用位置 0.562 5 m 处的焊钉拉拔应力几乎为 0。

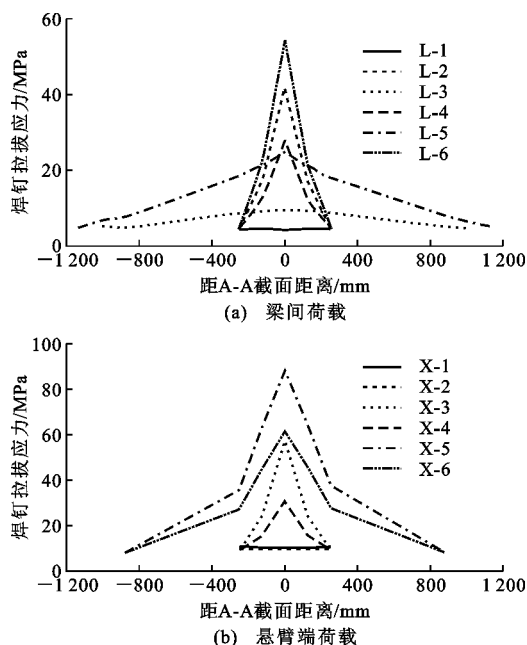


图 8 T 沿纵桥向分布

Fig. 8 T Distribution Along Longitudinal Direction of Bridge

3 焊钉拉拔应力参数分析

3.1 桥面板厚度与主梁间距比对焊钉拉拔应力的影响

研究梁间荷载最不利工况 L-6 与悬臂端荷载最不利工况 X-5 作用下, k_1 对双工字钢组合梁桥界面横桥向掀起效应的影响,基于 ABAQUS 有限元软件的双工字钢组合梁拉拔应力计算结果如图 9 所示 (T_{\max} 为焊钉最大拉拔应力)。2 种不同荷载作用位置焊钉拉拔应力的变化趋势一致。随着 k_1 的增大,焊钉拉拔应力逐渐减小,说明双工字钢组合梁的桥面板越薄,主梁间距越大,桥面板横桥向弯曲效应越明显,焊钉拉拔应力越大。

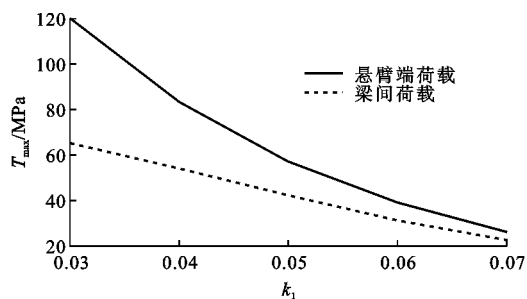


图 9 T_{\max} 随 k_1 变化趋势

Fig. 9 T_{\max} Variation Tendency with k_1

3.2 横梁设置位置对焊钉拉拔应力的影响

研究梁间荷载与悬臂端荷载最不利工况下,横

梁设置位置对焊钉拉拔力影响。有限元数值计算结果如图 10 所示,2 种不同作用位置的荷载工况下, k_2 变化对焊钉拉拔应力影响趋势相似。

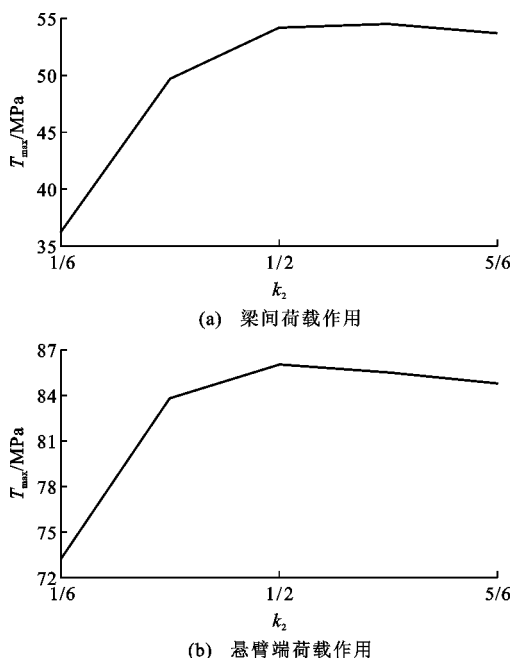


图 10 T_{\max} 随 k_2 变化趋势

Fig. 10 T_{\max} Variation Tendency with k_2

当 $k_2 < 1/2$, 即横梁位置处于一半钢梁高度位置以上时, 如图 11(a) 所示, 由于钢梁在横梁以下较大范围的侧向变形不能得到有效约束, 此时钢梁侧向变形较大, 焊钉拉拔应力较小。随着距钢梁上翼缘顶面距离 Z 的增大, 钢梁扭转约束越明显, 焊钉拉拔应力随之增大。

当 $k_2 \geq 1/2$, 即横梁位置处于一半钢梁高度位置以下时, 如图 11(b) 所示, 钢梁的侧向变形受到横梁约束, 焊钉拉拔应力较大, 且随着横梁距钢梁上翼缘距离增大, 横梁对钢梁扭转约束能力增强不再增大, 焊钉拉拔应力变化不明显。

当 k_2 接近于 1, 即横梁位置较靠近下翼缘时, 如图 11(c) 所示, 横梁与桥面板间存在较大范围的钢梁侧向变形无法得到约束, 焊钉拉拔应力略微减小。

3.3 焊钉横桥向间距对焊钉拉拔应力的影响

研究梁间荷载最不利工况 L-6 与悬臂端荷载最不利工况 X-5 作用下, 焊钉横桥向间距 d_j 对焊钉拉拔应力的影响。

如图 12 所示, 随着焊钉横向间距增大, 焊钉应力出现先增大后减小的趋势, 尤其是悬臂端荷载作用下, 下降趋势十分明显。焊钉拉拔应力与横向掀起位移呈正相关关系^[21], 相同的钢混界面分离程度

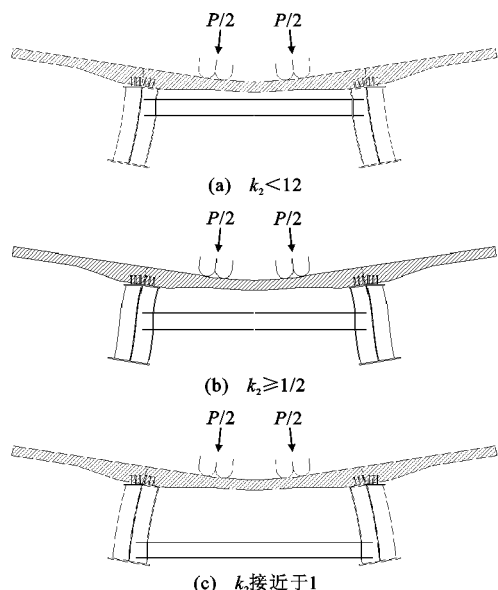


图 11 横梁位置对钢梁变形的影响

Fig. 11 Influence of Floor Girder Position on Steel Girder Deformation

下, 焊钉横桥向间距越大, 最外侧焊钉越靠近钢梁上翼缘边缘, 该处焊钉横向掀起位移越大, 焊钉拉拔应力越大, 但同时焊钉越靠近钢梁上翼缘边缘, 焊钉抑制钢混界面分离效果越明显, 钢混界面的横向掀起位移越小, 焊钉拉拔应力随之减小。受 2 个因素同时影响, 焊钉拉拔应力随着焊钉横桥向间距 d_j 增大, 出现先增大后减小的趋势。

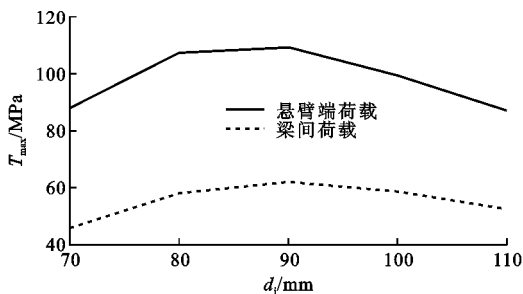


图 12 T_{\max} 随 d_j 的变化趋势

Fig. 12 T_{\max} Variation Tendency with d_j

3.4 各参数敏感性分析

为比较各参数对焊钉拉拔应力的影响程度, 将焊钉拉拔应力变化率与参数变化率的比值定义为敏感因子 η [式(3)]。敏感因子越大, 说明焊钉拉拔应力受此参数影响越大, 反之, 敏感因子越小, 说明该参数对焊钉拉拔应力的影响越不明显。

$$\eta = \frac{\sum |\Delta f| / f}{\sum |\Delta x| / x} \quad (3)$$

式中: f 为基准参数下焊钉拉拔应力, 取原设计为基

准参数; Δf 为不同参数下焊钉拉拔应力与基准参数下焊钉拉拔应力的差值; x 为基准参数; Δx 为参数与基准参数的差值。

各参数对焊钉拉拔应力的敏感性因子计算结果如图13所示,桥面板厚度与主梁间距比 k_1 对焊钉拉拔应力影响最显著,焊钉横桥向间距 d_j 影响次之, k_2 对焊钉拉拔应力影响最小。

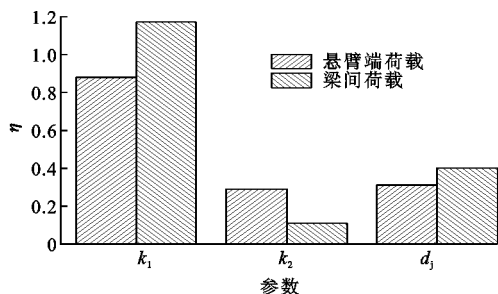


图13 焊钉拉拔应力对参数敏感性分析

Fig. 13 Parameter Sensitivity Analysis for Tensile Stress of Welding Studs

4 结 语

(1) 拉拔应力产生的原因是加劲肋限制了钢梁上翼缘随桥面板的变形,导致焊钉轴向受拉,出现拉拔应力。沿纵桥向,焊钉拉拔应力在荷载作用位置最大,随着离荷载距离的增大而减小,且衰减速度很快,距荷载位置0.5625 m处焊钉拉拔应力几乎衰减为0。因此,建议适当加密双工字钢组合梁在加劲肋附近的焊钉。

(2) 对于双工字钢组合梁桥的焊钉拉拔应力,车轮荷载作用位置处设置横梁的组合梁焊钉拉拔应力比不设置横梁的组合梁焊钉拉拔应力有大幅提高,焊钉最大拉拔应力最多能提高317.97%。因此,建议设计时双工字钢组合梁在横梁处的焊钉应适当加密。

(3) 焊钉拉拔应力随着桥面板厚度与主梁间距比 k_1 增大而逐渐减小。受横梁位置对钢梁侧向变形影响,当横梁中心线距钢梁上翼缘顶面距离与钢梁高度比 k_2 小于1/2时,焊钉拉拔应力随 k_2 的增大而增大;当 k_2 大于1/2时,拉拔应力随 k_2 的增大变化不明显;当 k_2 接近于1时,焊钉应力略微减小。随着焊钉横向间距增大,焊钉拉拔应力呈现出先增大后减小的趋势。各参数中,焊钉拉拔应力对主梁间桥面板厚与主梁间距比 k_1 最敏感,焊钉横桥向间距 d_j 影响次之,横梁中心线距钢梁上翼缘顶面距离与钢梁高度比 k_2 对焊钉拉拔应力影响最小。

参考文献:

References:

- [1] 刘永健,高诣民,周绪红,等.中小跨径钢-混凝土组合梁桥技术经济性分析[J].中国公路学报,2017,30(3):1-13.
LIU Yong-jian, GAO Yi-min, ZHOU Xu-hong, et al. Technical and Economic Analysis in Steel-concrete Composite Girder Bridge with Small and Medium Span[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 1-13.
- [2] 张凯.中小跨径钢板组合梁桥快速建造技术与应用研究[D].西安:长安大学,2016.
ZHANG Kai. Research on the Accelerated Construction Technology and the Application of Composite Steel Plate Girder Bridge with Medium-small Span [D]. Xi'an: Chang'an University, 2016.
- [3] 石雪飞,马海英,刘琛.双工字钢组合梁桥钢梁设计参数敏感性分析与优化[J].同济大学学报:自然科学版,2018,46(4):444-451.
SHI Xue-fei, MA Hai-ying, LIU Chen. Parametric Study and Optimization on Behavior of Twin-I Girder Composite Bridges[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2018, 46(4): 444-451.
- [4] 李慧,刘永健,张宁,等.冻融循环作用后栓钉连接件受剪性能试验研究[J].建筑结构学报,2019,40(5):149-155.
LI Hui, LIU Yong-jian, ZHANG Ning, et al. Experimental Study on Shear Performance of Stud Shear Connector After Undergoing Freeze-thaw Cycles[J]. Journal of Building Structures, 2019, 40(5): 149-155.
- [5] 许波,刘永健,朱伟庆,等.焊钉锈蚀后钢-混组合梁抗弯承载力简化计算方法[J].交通运输工程学报,2019,19(2):25-35.
XU Bo, LIU Yong-jian, ZHU Wei-qing, et al. Simplified Method of Calculating Flexural Capacity of Steel-concrete Composite Beam After Stud Corrosion[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2019, 19(02): 25-35.
- [6] 封博文,刘永健,彭元诚,等.施工误差对剪力钉工作性能的影响[J].建筑科学与工程学报,2018,35(1):119-126.
FENG Bo-wen, LIU Yong-jian, PENG Yuan-cheng, et al. Influence of Construction Error on Working Performance of Shear Stud[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2018, 35(1): 119-126.
- [7] JTG D64—2015,公路钢结构桥梁设计规范[S].
JTG D64—2015, Specifications for Design of Highway Steel Bridge[S]

- [8] 张俊平,焦兆平,黄道沸.大挑臂结合梁节段模型剪拔试验研究[J].华南理工大学学报:自然科学版,2002,30(2):64-68.
ZHANG Jun-Ping, JIAO Zhao-Ping, HUANG Dao-fei. A Study on the Long Cantilever Steel-concrete Composite Beam Segment Model Subjected to the Shear-uplifting Load[J]. Journal of South China University of Technology: Natural Science Edition, 2002, 30(2): 64-68.
- [9] 邵长宇.大跨度钢-混凝土连续组合箱梁桥关键技术研究[D].上海:同济大学,2006.
SHAO Chang-yu. Key Technological Study of Long Span Continuous Composite Box Girder Bridges[D]. Shanghai: Tongji University, 2006.
- [10] 侯健,罗扣.结合梁剪力钉布置形式研究[J].世界桥梁,2014,42(2):47-51.
HOU Jian, LUO Kou. Study of Shear Connector of Layout for Composite Girder [J]. World Bridges, 2014, 42(2): 47-51.
- [11] 周辉.钢-混凝土组合箱梁界面耦合作用机理研究[D].重庆:重庆交通大学,2016.
ZHOU Hui. Study on Interfacial Coupling Mechanism of Steel Concrete Composite Box Girder [D]. Chongqing: Chongqing Jiaotong University, 2016.
- [12] JTG D60—2015,公路桥涵设计通用规范[S].
JTG D60—2015, General Specifications for Design of Highway Bridges and Culverts[S]
- [13] GB 50010—2010,混凝土结构设计规范[S].
GB 50010—2010, Code for Design of Concrete Structures[S].
- [14] JTG/T D64-01—2015,公路钢混组合桥梁设计与施工规范[S].
JTG/T D64-01—2015, Specifications for Design and Construction of Highway Steel-concrete Composite Bridge[S].
- [15] JIANG L, LIU Y J, FAM A. Stress Concentration Factors in Joints of Square Hollow Section (SHS) Brace and Concrete-filled SHS Chord Under Axial Tension in Brace[J]. Thin-walled Structures, 2018, 132: 79-92.
- [16] JIANG L, LIU Y J, FAM A, et al. Stress Concentration Factor Parametric Formulae for Concrete-filled Rectangular Hollow Section K-joints with Perfobond Ribs[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2019, 160: 579-597.
- [17] 程高,刘永健,邱洁霖,等. PBL 加劲型矩形钢管混凝土不等宽 T 型节点应力集中系数分析[J]. 建筑科学与工程学报, 2014, 31(4): 74-79.
CHENG Gao, LIU Yong-jian, QIU Jie-lin, et al. Analysis of Stress Concentration Factor on Concrete-filled Rectangular Steel Tube T-joints Stiffened with PBL [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2014, 31(4): 74-79.
- [18] 马印平,刘永健,刘江.基于响应面法的钢管混凝土组合桁梁桥多尺度有限元模型修正[J].中国公路学报,2019,32(11):51-61.
MA Yin-ping, LIU Yong-jian, LIU Jiang. Multi-scale Finite Element Model Updating of CFST Composite Truss Bridge Based on Response Surface Method[J]. China Journal of Highway and Transport, 2019, 32(11): 51-61.
- [19] EI-LOBODY E, LAM D. Finite Element Analysis of Steel-concrete Composite Girders [J]. Advances in Structural Engineering, 2003, 6(4): 267-281
- [20] QUEIROZ F D, VELLASCO P C G S, NETHERCOT D A. Finite Element Modelling of Composite Beams with Full and Partial Shear Connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(4): 505-521.
- [21] 付果.考虑界面滑移及掀起影响的钢-混凝土组合梁试验与理论研究[D].西安:西安建筑科技大学,2008.
FU Guo. Experiments and Theoretic Research on Steel-concrete Composite Beams Considering Interface Slip and Uplift[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2008.
- [22] NGUYEN H T, KIM S E. Finite Element Modeling of Push-out Tests for Large Stud Shear Connectors [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2009, 65(10/11): 1909-1920.
- [23] XU C, SUGIURA K, WU C, et al. Parametrical Static Analysis on Group Studs with Typical Push-out Tests [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2012, 72: 84-96.
- [24] XU C, SUGIURA K. Parametric Push-out Analysis on Group Studs Shear Connector Under Effect of Bending-induced Concrete Cracks[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2013, 89: 86-97.