

抗剪连接程度对组合梁受力性能影响

黄 侨¹, 郑 兴¹, 李文贤²

(1. 东南大学 交通学院, 南京 211189; 2. 江苏省交通工程建设局, 南京 210004)

摘要: 为研究不同抗剪连接程度的钢-混凝土组合梁的受力状况,首先建立了组合梁的有限元模型进行计算,并通过4片试验梁检验其有效性和正确性。随后采用正交设计方法,选取焊钉数量、直径、长度和材料强度等因素对组合梁受力状态进行了参数分析。最后对抗剪连接程度的影响进行讨论,拟合得到不同连接程度下组合梁抗弯承载力和梁端滑移的计算公式。研究结果表明,焊钉数量和直径对组合梁界面滑移的影响最为明显;拟合公式能够较为准确地计算得到不同连接程度组合梁的承载力和梁端滑移;在桥梁工程中,由于连接件的数量通常是由构造要求决定的,故组合梁界面滑移的限值通常不控制设计。

关键词: 钢-混凝土组合梁;抗剪连接程度;参数分析;试验研究;承载力;界面滑移

中图分类号: U443.35

文献标志码: A

Effect of Shear Connection Degree on Mechanical Behavior of Composite Beams

HUANG Qiao¹, ZHENG Xing¹, LI Wenxian²

(1. School of Transportation, Southeast University, Nanjing, 211189, China; 2. Jiangsu Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing, 210004, China)

Abstract: In order to study the mechanical behavior of steel-concrete composite beams with different shear connection degree, finite element models of composite beams are established. In addition, the validity and correctness of models are verified by four beam tests. Moreover, factors such as the number, diameter, length and material strength of the studs are selected to conduct the parametric study, by using the orthogonal test method. Furthermore, the influence of shear connection degree is discussed and the fitting formulas of bending capacity and end slip of composite beams are obtained. The results show that the number and diameter of studs have the most significant effect on the interface slip of

composite beams. In addition, the bending capacity and beam end slip of composite beams with different connection degrees can be accurately predicted using fitting formulas. Moreover, in bridge engineering, as the studs are usually distributed according to structural requirements, the limit value of interface slip is not the controlling factor when designing composite beams.

Key words: composite beam; shear connection degree; parametric study; beam test; bending capacity; interface slip

钢-混凝土组合梁是桥梁工程中常用的一种主梁形式,它合理地利用钢材和混凝土不同的受力特性,兼具钢结构和混凝土结构的优点。在设计钢-混凝土组合梁时,为防止钢梁与混凝土翼缘板间出现过大的界面滑移,在混凝土翼缘板和钢梁之间需布置连接件,确保两者共同受力。根据连接件布置数量的多少,组合梁可以分为部分连接组合梁和完全连接组合梁。文献[1]中按照式(1)对抗剪连接程度 η 进行定量计算。

$$\eta = \frac{n}{\left[\frac{\min \{A_s f_d, A_c f_{cd}\}}{N_v^c} \right]} \quad (1)$$

式中: n 为连接件的数量; A_s 和 A_c 分别为断面上钢梁和混凝土的面积; f_d 和 f_{cd} 分别为钢和混凝土的设计强度; N_v^c 为单个连接件的抗剪承载力。在此,连接程度 η 可定义为在一个剪跨范围内实际的连接件数量与抗弯极限状态下所需的连接件数量之比。

自从Newmark^[2]最早提出了考虑部分抗剪连接的组合梁的弹性分析理论之后,许多国内外学者都对抗剪连接程度对组合梁产生的影响开展了理论和试验研究。Ranzi和Zona^[3]对部分连接组合梁进行研究时,推导了将混凝土板视为欧拉梁,钢梁视为铁

收稿日期: 2021-04-23

基金项目: 国家自然科学基金(51278119);江苏省自然科学基金面上项目(BK20181278);中交集团院士专项科学经费项目(YSZX-03-2020-01-B)

第一作者: 黄侨(1958—),男,教授,博士生导师,工学博士. 主要研究方向为桥梁钢-混凝土组合结构设计理论.

E-mail: qhuanghit@126.com



木辛柯梁,再将二者耦合在一起的计算方法。荣学亮^[4]进行了钢-混组合梁中的焊钉连接件的锈蚀疲劳试验研究。汪炳^[5]开展试验,对焊钉连接件和开孔钢板连接件的滑移量进行了对比分析。Wang等^[6]对不同连接程度的组合梁进行疲劳试验,对组合梁的疲劳寿命进行分析和预测。黄侨等^[7]进行理论推导,得到了考虑界面滑移和剪切变形时组合梁下挠和截面应力的解析解,并通过试验验证了结果的正确性。

近年来,随着数值模拟方法的发展,有限元计算成为了除理论推导和实验研究外,分析复杂结构受力状态的重要方法之一。Queiroz等^[8]采用ANSYS有限元软件,对完全连接组合梁和部分连接组合梁的荷载-滑移曲线、纵向界面滑移、焊钉剪力分布和破坏形态等进行了研究。Xing等^[9]建立了钢-橡胶填充混凝土部分连接组合梁的有限元模型并进行参数分析。Classen等^[10]采用有限元方法对钢-高强混凝土组合梁滑移不超过限值时的最小抗剪连接程度进行计算,随后针对T型钢梁的部分连接组合梁,研究了设计该类组合梁时应满足的要求^[11]。Ozturk等^[12]基于OpenSees软件平台建立了槽钢-混凝土部分组合梁的非线性纤维有限元模型。Zheng等^[13]对有限元模拟组合梁受力状况时采用的建模方法和细节进行了讨论。

有限元计算的广泛应用有效节约了以往进行试验所需要耗费的成本和时间。采用有限元模型的数值模拟方法可以更加方便地对组合梁承载力和界面滑移等重要指标进行参数分析。然而,若将精细化模型计算至结构破坏,进行多因素、多水平的参数分析时,计算规模将会过于庞大。为此,可以采用正交设计,达到以部分试验代替全面试验的效果,随后对部分试验的结果进行数据分析,即可了解全面试验的情况^[14]。

另外,研究钢-混组合梁抗剪连接程度对结构承载力和界面滑移的影响时,在参考现有计算公式形式的基础上^[15],可以将试验数据和有限元模型的计算结果进行公式拟合,从而得到能够更加有效和准确地预测组合梁承载力和界面滑移的计算方法,为组合梁设计提供参考。

为对不同抗剪连接程度的组合梁的受力状况进行研究,本文首先建立了4个布置不同数量焊钉的组合梁有限元模型,并进行梁式试验,通过将两者的结果进行对比,检验了有限元模型的正确性。随后基于ABAQUS软件的二次开发,实现了参数化建模,并针对焊钉数量、直径、长度和材料强度等因素,进行了正交设计和参数分析。最后,对抗剪连接程度对组合梁受力的影响展开讨论,拟合得到了不同抗剪连接程度的组合梁承载力和梁端滑移的计算公式。

1 建立有限元模型

1.1 几何模型

运用大型通用有限元软件ABAQUS,建立4个不同焊钉间距的钢-混凝土简支组合梁的有限元模型,分别编号为SCB-1至SBC-4。简支梁计算跨径为3.0 m,在建模时考虑到模型受力的对称性,为减小计算耗时,仅建立二分之一模型,并相应在跨中处设置对称边界约束。工字形钢梁的上翼缘板宽度为120 mm,下翼缘板宽度为160 mm,腹板高度为150 mm。翼板和腹板厚度均为10 mm。混凝土翼缘板断面尺寸为宽300 mm、高80 mm。按照构造要求,在混凝土板中共设置6根 $\Phi 6$ 纵向钢筋和间距200 mm的 $\Phi 6$ 箍筋。组合梁的立面构造图及横断面图如图1所示。

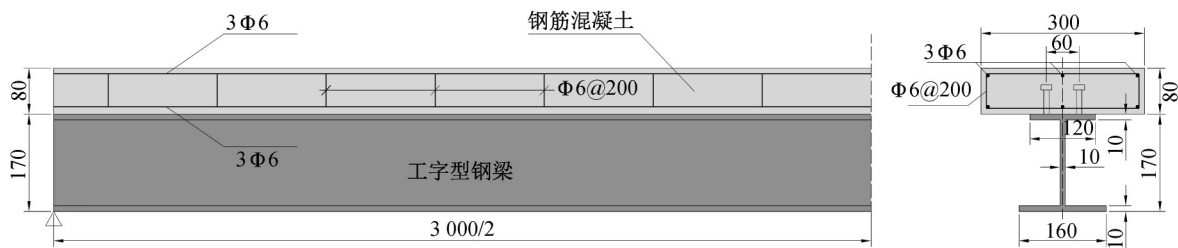


图1 组合梁构造图(单位:mm)

Fig. 1 General layout of composite beams (unit: mm)

抗剪连接程度 η 是本文中主要研究的对比参数。模型中采用双排布置的 $\Phi 13 \times 60$ 焊钉,横向间距为60 mm。模型SCB-1为完全抗剪连接($\eta=1$),

SCB-2和SCB-3设计为部分抗剪连接($\eta < 1$),SCB-4则布置数量多于SCB-1的焊钉($\eta > 1$)。4个模型的焊钉布置情况见表1。

表 1 焊钉布置情况表
Tab. 1 Distribution of studs

模型	焊钉纵向间距/ mm	半跨焊钉个数/ 个	抗剪连接程度 η
SCB-1	215	14	1.00
SCB-2	320	10	0.71
SCB-3	400	8	0.57
SCB-4	186	16	1.14

1.2 建模方法

为较准确地模拟混凝土板、工字钢梁和焊钉之间的接触,因此混凝土板、钢梁和焊钉均采用 C3D8R 实体单元,纵向钢筋和箍筋采用 T3D2 桁架单元。为了更好地模拟焊钉及周边混凝土的受力状态,在焊钉附近对网格尺寸进行局部加密。划分网格后的有限元模型(以 SCB-4 为例)如图 2 所示。

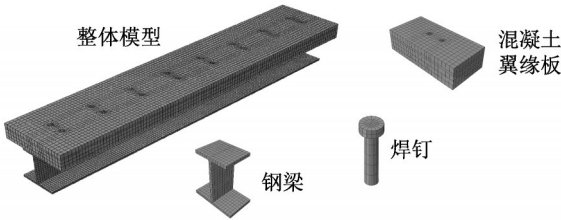


图 2 有限元模型图
Fig. 2 Finite element model

根据材料试验结果^[16],得知混凝土抗压强度为 38.5 MPa,并由此确定混凝土应力-应变曲线,在 ABAQUS 中定义了相应的混凝土本构模型。钢梁弹性模量为 2.06×10^5 MPa,屈服强度为 352 MPa,钢筋弹性模量为 2.0×10^5 MPa,屈服强度为 365 MPa,应力-应变曲线用双折线模型模拟。通过焊钉推出试验,得到焊钉的弹性模量为 2.0×10^5 MPa,极限强度为 525 MPa。

在各个构件之间的接触设置上,ABAQUS 提供了多种接触关系,结合模型试算和试验研究^[13],模型中主要采用的接触设置如表 2 所示。

表 2 模型接触关系
Tab. 2 Contact relationship in models

接触构件	接触类型
钢梁顶面与混凝土板底面	法向硬接触,切向罚摩擦
栓帽与混凝土孔洞	合并(Merge)
栓帽底面与栓杆顶面	绑定(Tie)
栓杆与混凝土孔洞	法向硬接触
栓杆底面与钢梁	合并(Merge)
钢筋与混凝土板	嵌入(Embed)

在模型的支座位置,按照简支梁边界条件进行约束,跨中位置施加对称边界约束。加载时,在简支梁跨

中的上方设置一个参考点,并对其施加竖直向下的位移。通过将参考点与混凝土顶面的一块区域进行耦合,使参考点的位移刚性地传递至混凝土顶面。

2 有限元模型的试验验证

2.1 试验布置

为验证 ABAQUS 有限元模型的有效性和正确性,对试件 SCB-1 至 SCB-4 均进行了跨中加载的梁式试验。加载前期以 $10 \text{ kN} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速率进行荷载控制,当加载至弹性极限荷载后,改为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的位移控制加载直至破坏,得到其抗弯承载力。加载时对梁端的混凝土板底面和钢梁顶面的纵向位移分别进行观测,可得到梁端的荷载-滑移曲线。试验装置如图 3 所示。

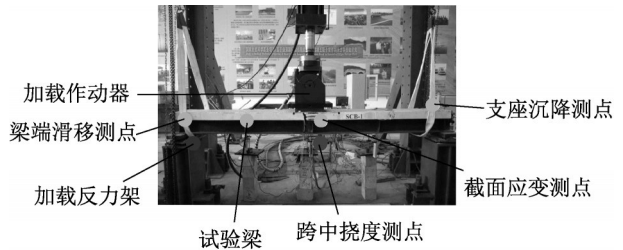


图 3 梁式试验装置图
Fig. 3 Setup of beam test

2.2 模型有效性验证

将有限元模型对试件 SCB-1 至 SCB-4 的计算抗弯承载力与其试验结果进行对比,如表 3 所示。结果表明,布置焊钉的数量对组合梁的抗弯承载力有明显的影 响,即截面抗弯承载力随着连接程度的增加而略有提高。4 个模型的有限元计算值和试验结果较为接近,其误差均不超过 3%,同时也验证了有限元模型的有效性和正确性。

表 3 跨中截面抗弯承载力计算结果及对比
Tab. 3 Results of bending capacity

模型	有限元模型值/kN	梁式实验值/kN	误差/%
SCB-1	226	228	-1.0
SCB-2	220	221	-0.4
SCB-3	213	211	0.8
SCB-4	240	233	-2.9

将有限元计算结果与梁式试验得到的荷载-滑移曲线的全过程进行对比,如图 4 所示。图中可以看出,相对于抗弯承载力而言,抗剪连接程度对荷载-滑移曲线具有更为显著的影响,即滑移曲线随着连接程度的增加而明显延长。有限元模型和试验得到

的荷载-滑移曲线趋势相同,结果基本吻合,说明本文有限元模型能够较为准确地模拟不同连接程度组合梁的界面滑移全过程。试验结果和模拟计算表明,当连接程度 $\eta=0.57\sim1.14$ 时,承载能力极限状态下的界面滑移范围远超过1 mm,此时的滑移量较大恰恰是截面塑性抗弯承载力计算的必要条件。

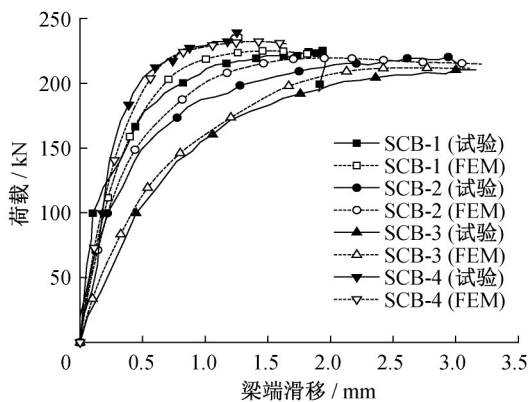


图 4 荷载-滑移曲线
Fig. 4 Curves of load-slip

3 参数分析

3.1 参数设置

为研究不同的焊钉数量(半跨)、长度、直径和材料强度对组合梁受力状态的影响,本文进行了主要

影响因素的参数分析。相较于 ABAQUS/CAE 进行建模的方法,基于 Python 语言,利用 ABAQUS 脚本接口进行二次开发能够更加方便地实现参数化建模及分析。本文针对上述参数编写了 Python 脚本程序,实现参数化建模。分析中考虑的各因素及水平如表 4 所示。半跨的焊钉个数设置了 6 个水平,其余参数均设置 3 个水平。

表 4 各因素水平表				
Tab. 4 Levels of different factors				
水平数	数量/个	直径/mm	长度/mm	强度/MPa
1	8	10	55	445
2	12	13	60	485
3	16	16	65	525
4	20			
5	24			
6	28			

若将所有参数水平组合全部进行计算所需要的计算代价太大,因此可采用正交设计,将各个因素的各个水平的组合进行合理的分配,实现因素和水平的整齐可比性和均匀分散性,从而达到用部分模型代替全面模型来了解各参数对结果影响情况的目的^[14]。表 5 中给出了基于正交设计制定的混合水平正交表,并针对 18 个参数化模型分别进行有限元计算。例如表 5 中试验序号为 1 号的模型,其焊钉数量为 8 个(半跨内)、焊钉直径为 10 mm、焊钉长度为 55 mm、焊钉材料的极限强度为 445 MPa。

表 5 正交设计计算方案表								
Tab. 5 Calculation scheme of orthogonal design								
试验序号	数量(j=1)	直径(j=2)	长度(j=3)	强度(j=4)	空列(j=5)	空列(j=6)	空列(j=7)	连接程度 η
1	1	1	1	1	1	1	1	0.304
2	1	2	2	2	2	2	2	0.560
3	1	3	3	3	3	3	3	0.919
4	2	2	1	1	2	3	3	0.771
5	2	3	2	2	3	1	1	1.273
6	2	1	3	3	1	2	2	0.538
7	3	1	1	2	3	2	3	0.663
8	3	2	2	3	1	3	1	1.213
9	3	3	3	1	2	1	2	1.557
10	4	3	1	3	2	2	1	2.297
11	4	1	2	1	3	3	2	0.760
12	4	2	3	2	1	1	3	1.401
13	5	3	1	2	1	3	2	2.546
14	5	1	2	3	2	1	3	1.077
15	5	2	3	1	3	2	1	1.542
16	6	2	1	3	3	1	2	2.123
17	6	3	2	1	1	2	3	2.725
18	6	1	3	2	2	3	1	1.160

3.2 计算结果和数据分析

针对正常使用极限状态,《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)^[17]中要求结合面最大滑移小于等于0.2 mm。对于桥梁结构,正常使用极限状态下对应的荷载效应约为承载能力极限状态的0.55至0.65倍。因此,对正交设计有限元模型的0.6倍承载力下梁端滑移量进行数值模拟研究。对18个正交设计参数化有限元模型的计算结果如表6所示。

在对抗弯承载力计算结果进行数据分析时,首先计算各因素下承载力的极差,判断各因素的总体影响程度。随后在方差分析中,对各列因素偏差平方和进行计算,并与误差偏差平方和进行对比,构造 F 统计量进行 F 检验,检验各个因素影响程度的显著性^[14],计算结果如表7所示。

表7中, K_{ij} 为第 j 列因素在 i 水平时对应的试验指标之和, k_{ij} 为第 j 列因素在 i 水平时对应的试验指标平均值。分析表明,焊钉数量和直径对于钢-混组合梁抗弯承载力的影响最大,而焊钉长度和材料强度在考虑范围内影响甚微。这是由于在本文研究的范围内,焊钉数量和焊钉直径对组合梁的连接程度具有最直接的影响。更多的焊钉数量和更大的焊钉直径能够使组合梁具有更高的连接程度,加强钢梁与混凝土翼缘板之间受力的整体性,防止混凝土翼

表6 基于正交设计的有限元模型抗弯承载力计算结果

Tab. 6 Results of finite element models in orthogonal test

试验序号	抗弯承载力/ kN	0.6倍抗弯承载力下 的梁端滑移/mm	连接程度 η
1	206.8	0.923	0.304
2	215.2	0.635	0.560
3	226.5	0.359	0.919
4	226.4	0.417	0.771
5	230.1	0.240	1.273
6	219.8	0.589	0.538
7	223.2	0.414	0.663
8	228.2	0.275	1.213
9	234.6	0.186	1.557
10	237.6	0.156	2.297
11	229.9	0.324	0.760
12	234.9	0.224	1.401
13	237.9	0.125	2.546
14	231.8	0.231	1.077
15	236.4	0.180	1.542
16	239.3	0.145	2.123
17	242.3	0.103	2.725
18	237.5	0.190	1.160

板的掀起和焊钉的断裂,从而使得组合梁具有更高的承载力。

在 F 检验时,仅对焊钉数量和直径的影响程度显著性进行检验。经检验,焊钉数量和直径的影响均在 $\alpha=0.005$ 水平显著,焊钉数量的影响尤为明显。各因素对组合梁承载力的影响如图5所示。

表7 抗弯承载力数据分析表

Tab. 7 Data analysis of bending capacity

计算量	数量($j=1$)	直径($j=2$)	长度($j=3$)	强度($j=4$)	空列($j=5$)	空列($j=6$)	空列($j=7$)
K_{1j}	648.5	1 348.9	1 371.1	1 376.4	1 369.9	1 377.5	1 376.6
K_{2j}	676.3	1 380.4	1 377.5	1 378.7	1 383.1	1 374.5	1 376.7
K_{3j}	686.0	1 409.1	1 389.8	1 383.3	1 385.4	1 386.4	1 385.1
K_{4j}	702.3						
K_{5j}	706.2						
K_{6j}	719.1						
k_{1j}	216.2	224.8	228.5	229.4	228.3	229.6	229.4
k_{2j}	225.4	230.1	229.6	229.8	230.5	229.1	229.5
k_{3j}	228.7	234.9	231.6	230.5	230.9	231.1	230.9
k_{4j}	234.1						
k_{5j}	235.4						
k_{6j}	239.7						
极差 R_j	23.5	10.1	3.1	1.1	2.6	2.0	1.4
偏差平方和 γ_{ssj}	1 059.7	302.6	29.9	4.0	误差 $\gamma_{sse}=43.8$		
统计量 F_j	27.3	19.5					

按照同样方法对各个模型中0.6倍抗弯承载力时的梁端滑移计算值进行分析,结果如表8所示。

图6为各因素对承载力的影响。图中可见各因素与组合梁梁端滑移均呈负相关。结合图6和表8可以发现,4个因素中,焊钉数量的影响最大,焊钉直

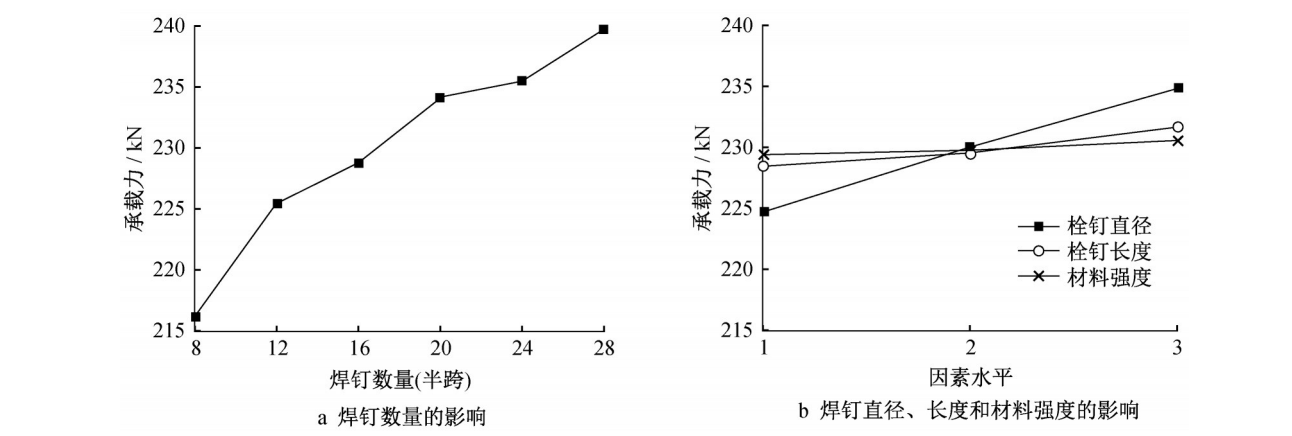


图5 各因素对抗弯承载力影响
Fig. 5 Influence of factors on bending capacity

表8 梁端滑移数据分析表
Tab. 8 Data analysis of beam end slip

计算量	数量($j=1$)	直径($j=2$)	长度($j=3$)	强度($j=4$)	空列($j=5$)	空列($j=6$)	空列($j=7$)
K_{1j}	1.917	2.671	2.18	2.133	2.326	1.949	1.774
K_{2j}	1.245	1.876	1.807	1.828	1.625	2.164	2.004
K_{3j}	0.875	1.168	1.728	1.754	1.662	1.5	1.835
K_{4j}	0.704						
K_{5j}	0.536						
K_{6j}	0.438						
k_{1j}	0.639	0.445	0.363	0.356	0.388	0.325	0.296
k_{2j}	0.415	0.313	0.301	0.305	0.271	0.361	0.334
k_{3j}	0.292	0.195	0.288	0.292	0.277	0.25	0.306
k_{4j}	0.235						
k_{5j}	0.179						
k_{6j}	0.146						
极差 R_j	0.493	0.250	0.075	0.063	0.117	0.111	0.038
偏差平方和 γ_{ssj}	0.507	0.188	0.019	0.013	误差 $\gamma_{sse}=0.049$		
统计量 F_j	12.4	11.5					

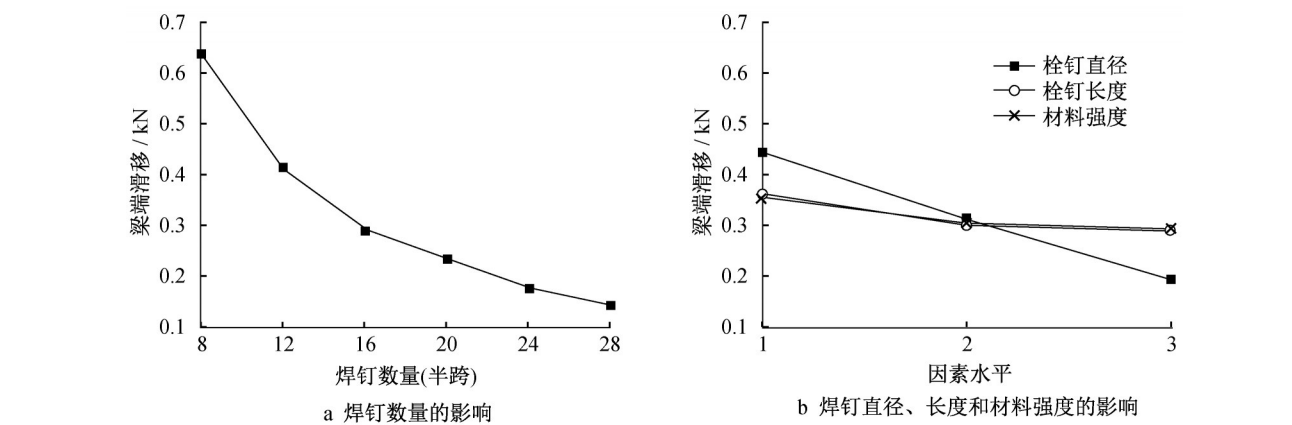


图6 各因素对梁端滑移影响
Fig. 6 Influence of factors on beam end slip

径次之,而焊钉的长度与材料强度对正常使用极限状态下的组合梁滑移影响较小。焊钉数量对滑移的影响呈现出非线性,焊钉数量较少时,其对梁端滑移的影响相对更加明显。

4 抗剪连接程度的影响分析

4.1 对承载力的影响

根据有限元计算的结果,可以通过公式拟合得到抗剪连接程度对钢-混组合梁抗弯承载力的影响。

对抗剪连接程度 η 不小于1.0的完全组合梁,一般认为其连接程度对承载力的影响不大。文献[18]认为完全连接组合梁的承载力与塑性抗弯承载力公式的计算结果较为吻合。完全连接组合梁的延性较高,在极限状态下,钢梁的下翼缘和部分腹板已进入强化阶段,界面滑移效应对抗弯承载力的影响较小。《钢-混凝土组合桥梁设计规范》(GB 50917—2013)^[19]中,按照塑性设计方法,计算正弯矩作用下组合梁的抗弯承载力 M 的公式如式(2)~(3)所示。

$$M = kM_u \quad (2)$$

$$k = 1 - 0.048e^{-0.43\eta} \quad (3)$$

式中: k 为考虑滑移效应的拟合系数; M_u 为按照混凝土板与钢梁刚接计算的组合梁塑性承载力,即不考虑界面滑移的计算结果。当 $\eta=1.0$ 时, $k=0.96$,即认为完全抗剪连接时,滑移效应对组合梁承载力的影响不大。

而部分连接组合梁的承载力通常由钢梁承载力 M_s 和完全连接组合梁承载力 M_u 内插得到,文献[15]和文献[20]分别采用式(4)的线性和式(5)的非线性内插进行计算。

$$M = M_s + \eta(M_u - M_s) \quad (4)$$

$$M = M_s + \eta^{0.5}(M_u - M_s) \quad (5)$$

对正交设计的有限元模型计算中组合梁的连接程度与其抗弯承载力进行拟合,得到类似形式的拟合计算公式。对 $\eta \geq 1.0$ 的完全连接组合梁,拟合公式如式(6),11个正交设计模型的拟合优度 $R^2=0.60$,精度可以接受。

$$M = (1 - 0.112e^{-0.73\eta})M_u \quad (6)$$

对 $\eta < 1.0$ 的部分连接组合梁,拟合公式如式(7),7个正交设计模型的拟合优度 $R^2=0.87$,精度较高。

$$M = M_s + \eta^{0.22}(M_u - M_s) \quad (7)$$

钢-混组合梁抗剪连接程度对抗弯承载力的影响及各公式的计算结果如图7所示。可以看出,采用线性内插式(4)计算部分连接组合梁的承载力将略偏于保守,本文拟合式(7)和非线性内插式(5)的曲线相对更符合有限元计算和梁式实验的结果。而对于完全连接组合梁,当 $1.0 \leq \eta < 1.5$ 时,有限元的计算结果与式(2)和式(6)的计算结果吻合较好,误

差均不超过5%,当连接程度大于1.5时,各计算公式和有限元模拟结果则几乎完全吻合。

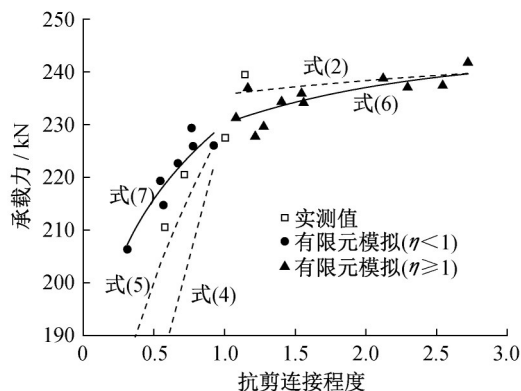


图7 抗剪连接程度对承载力的影响

Fig. 7 Influence of shear connection degree on bearing capacity

4.2 对梁端滑移的影响

图8给出了18个正交设计模型在0.6倍抗弯承载力时梁端滑移值与梁式试验实测值的比较。两者的分布规律大致相同,随着抗剪连接程度的增加,梁端滑移将逐渐减少,并趋于稳定。对有限元模型计算得到的数值进行数据拟合(图8中的曲线),可以得到:

$$s = 0.3\eta^{-0.974} \quad (8)$$

18个正交设计模型的拟合优度 $R^2=0.96$,拟合程度很好。此时将 $s=0.2$ mm代入,可得 $\eta=1.5$,即当抗剪连接程度大于1.5时,钢-混组合梁的梁端滑移量将小于0.2 mm。

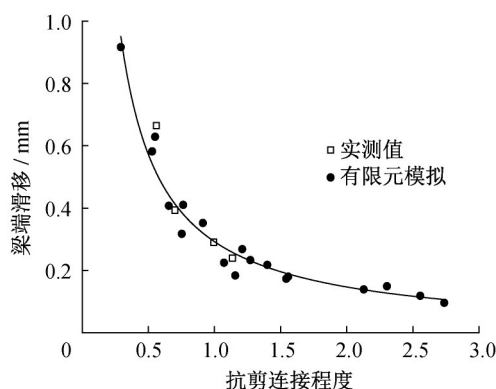


图8 抗剪连接程度对梁端滑移的影响

Fig. 8 Influence of shear connection degree on beam end slip

抗剪连接程度是一个基于连接件布置的相对指标,而规范中焊钉抗剪承载力的设计值往往比实际值偏低,因此组合梁的连接程度往往偏安全地被低估。同时,

在实际桥梁工程中,根据《公路钢混组合桥梁设计与施工规范》(JTG/T D64-01—2015)^[17]的构造要求,出于抗疲劳、耐久性及密实混凝土的考虑,焊钉连接件的间距通常取100~300 mm,且横向可布置2~6列,此时连接件的布置已较为密集,钢-混组合梁抗剪连接程度一般远大于1.0。所以在正常使用极限状态下,规范^[17]中针对连接件的“结合面最大滑移小于等于0.2 mm”的要求一般不控制设计。

5 结论

对不同抗剪连接程度的钢-混凝土组合梁进行有限元模拟和梁式试验,针对其承载力和界面滑移等问题展开研究,并进行基于正交设计的参数分析,进一步讨论了抗剪连接程度对组合梁受力的影响,可供钢-混凝土组合梁桥设计参考。本文研究得出的主要结论如下:

(1)通过将有限元模型计算结果与梁式实验结果进行对比,可以发现有限元模型不仅可以较为精确地对组合梁进行承载力计算,还可以模拟不同抗剪连接程度时组合梁界面滑移全过程的发展情况。

(2)利用正交设计和参数化有限元计算方法研究组合梁中配置的焊钉数量、长度、直径和材料强度等因素对组合梁抗弯承载力和梁端滑移的影响。结果表明,焊钉数量对组合梁的受力状态影响最大,其次是焊钉直径,而焊钉长度和焊钉材料强度在本文研究的范围内影响相对较小。

(3)在钢-混组合梁的承载力计算中,需对部分连接组合梁和完全连接组合梁分别讨论。部分连接组合梁的承载力应由钢梁承载力和完全刚性连接的组合梁承载力非线性内插得到,文中式(7)的拟合效果较好。连接程度 $\eta \geq 1.0$ 时对组合梁的抗弯承载力影响很小,或可选用文中拟合式(6)或规范中采用的式(2)进行计算,均可得到较为准确的结果。

(4)若偏安全地采用组合梁承受0.6倍抗弯承载力时的梁端滑移量来考虑桥梁在正常使用极限状态下的滑移,式(8)可以较好地拟合组合梁抗剪连接程度与梁端滑移之间的关系。当抗剪连接程度 η 大于1.5时,0.6倍承载力下梁端滑移即可小于0.2 mm。

作者贡献说明:

黄侨:研究选题,提供研究思路和技术指导,论文审定。

郑兴:有限元计算,数据处理与论文撰写。

李文贤:有限元建模与正交设计。

参考文献:

- [1] 黄侨. 桥梁钢-混凝土组合结构设计原理[M]. 2版. 北京: 人民交通出版社, 2018.
HUANG Qiao. Design principle of bridge steel-concrete composite structure [M]. 2nd ed. Beijing: China Communications Press, 2018.
- [2] NEWMARK N M, SEISS C P, VIEST I M. Test and analysis of composite beams with in-complete interaction [J]. Experimental Stress Analysis, 1951, 9(1): 75.
- [3] RANZI G, ZONA A. A steel - concrete composite beam model with partial interaction including the shear deformability of the steel component [J]. Engineering Structures, 2007, 29(11): 3026.
- [4] 荣学亮. 钢-混凝土组合梁桥耐久性若干问题的研究[D]. 黑龙江: 哈尔滨工业大学, 2011.
RONG Xueliang. Research on some problems in durability of steel-concrete composite beam bridges [D]. Heilongjiang: Harbin Institute of Technology, 2011.
- [5] 汪炳. 基于疲劳累积损伤效应的钢-混凝土组合梁桥剩余力学性能研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
WANG Bing. Study on residual mechanical properties of steel-concrete composite beam bridges based on cumulative fatigue damage [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [6] WANG B, HUANG Q, LIU X, *et al.* Experimental investigation of steel-concrete composite beams with different degrees of shear connection under monotonic and fatigue loads [J]. Advances in Structural Engineering, 2018, 21(2): 227.
- [7] 黄侨, 李文贤, 汪炳. 考虑界面滑移与剪切变形的钢-混凝土组合梁解析方法[J]. 南京航空航天大学学报, 2018, 50(1): 131.
HUANG Qiao, LI Wenxian, WANG Bing. Analytical method and verification of steel-concrete composite beam considering interface slip and shear deformation [J]. Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, 2018, 50(1): 131.
- [8] QUEIROZ F, VELLASCO P, NETHERCOT D. Finite element modelling of composite beams with full and partial shear connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2007, 63(4): 505.
- [9] XING Y, HAN Q, XU J, *et al.* Experimental and numerical study on static behavior of elastic concrete-steel composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2016, 123: 79.
- [10] CLASSEN M, STARK A, HEGGER J. Steel-HSC composite beams with partial shear connection and miniaturized limited-slip-capacity connectors [J]. Steel Construction, 2018, 11(1): 94.
- [11] CLASSEN M. Limitations on the use of partial shear connection in composite beams with steel T-sections and uniformly spaced rib

- shear connectors [J]. *Journal of Constructional Steel Research*, 2018, 142: 99.
- [12] OZTURK A, BARANE, TORT C. Nonlinear fiber modeling of steel-concrete partially composite beams with channel connectors [J]. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 2019, 23(5): 2227.
- [13] ZHENG X, LI W X, HUANG Q, *et al.* Finite element modeling of steel-concrete composite beams with different shear connection degrees [J]. *International Journal of Steel Structures*, 2021, 21(1): 381.
- [14] 刘瑞江,张业旺,闻崇炜,等. 正交试验设计和分析方法研究[J]. *实验技术与管理*, 2010, 27(9): 52.
LIU Ruijiang, ZHANG Yewang, WEN Chongwei, *et al.* Study on the design and analysis methods of orthogonal experiment [J]. *Experimental Technology and Management*, 2010, 27(9): 52.
- [15] JOHNSON R P, MAY I M. Partial-interaction design of composite beams [J]. *Structural Engineer*, 1975, 53(8):305.
- [16] 李文贤. 不同连接程度下钢-混凝土组合梁的理论及试验研究[D]. 南京: 东南大学, 2018.
LI Wenxian. Theory and experimental research on steel-concrete composite beams with different degrees of shear connection [D]. Nanjing: Southeast University, 2018.
- [17] 中华人民共和国交通运输部. 公路钢混组合桥梁设计与施工规范: JTG/T D64-01—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
Ministry of Transport of the People's Republic of China. Specification for design and construction of highway steel-concrete composite bridge: JTG/T D64-01—2015 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015.
- [18] 聂建国. 钢-混凝土组合梁结构: 试验、理论与应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
NIE Jianguo. Steel-concrete composite beam structure: experiment, theory and application [M]. Beijing: Science Press, 2005.
- [19] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢-混凝土组合桥梁设计规范: GB 50917—2013[S]. 北京: 中国计划出版社, 2013.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of steel and concrete composite bridges: GB 50917—2013 [S]. Beijing: China Planning Press, 2013.
- [20] 聂建国,崔玉萍,石中柱,等. 部分剪力连接钢-混凝土组合梁受弯极限承载力的计算[J]. *工程力学*, 2000(3): 37.
NIE Jianguo, CUI Yuping, SHI Zhongzhu, *et al.* Ultimate flexural capacity of composite steel-concrete beams with partial shear connection [J]. *Engineering Mechanics*, 2000 (3): 37.