

套筒焊钉连接件抗剪性能与受力机理研究

吴 飞¹, 苏 航², 苏庆田¹, 林志平³, 刘新华⁴

(1. 同济大学 土木工程学院, 上海 200092; 2. 上海市建设工程安全质量监督总站, 上海 200032; 3. 福建省高速公路建设总指挥部, 福建 福州 350001; 4. 中交第二公路勘察设计研究院有限公司, 湖北 武汉 430056)

摘要: 为了研究套筒焊钉连接件的抗剪性能, 设计了 8 个焊钉推出试件, 通过静力加载试验测试了套筒焊钉连接件的受力性能, 比较了新型套筒焊钉和常规焊钉的抗剪性能差异。参照试验建立 Abaqus 非线性有限元模型, 研究了套筒焊钉连接件的抗剪机理。试验结果表明: 套筒焊钉连接件的总体抗剪性能与普通焊钉连接件的接近, 与常规焊钉相比, 套筒焊钉的极限承载力提升 4%~8%, 抗剪刚度提升 25%~35%。有限元分析表明: 套筒焊钉连接件的抗剪破坏过程与普通焊钉连接件的接近, 但套筒焊钉连接件的破坏在焊钉根部的长度范围比普通焊钉的小, 焊钉应力比普通焊钉的小; 套筒焊钉连接件的混凝土破坏发生在套筒内部的混凝土中, 套筒外部的混凝土没有破坏。试验和数值计算表明新型套筒焊钉连接件的力学性能略优于普通焊钉连接件的, 在工程中按照普通焊钉连接件的计算方法进行设计计算是可行的。

关键词: 连接件; 组合梁; 套筒; 焊钉; 试验; 有限元

中图分类号: U441

文献标志码: A

Shear Performance and Mechanism Analysis of Sleeved Stud Connectors

WU Fei¹, SU Hang², SU Qingtian¹, LIN Zhiping³, LIU Xinhua⁴

(1. College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China; 2. Shanghai Municipal Safety and Quality Supervision Administration for Construction Engineering, Shanghai 200032, China; 3. Expressway Construction Headquarters of Fujian Province, Fuzhou 350001, China; 4. China Communications Second Highway Survey, Design and Research Institute Co., Ltd., Wuhan 430056, China)

Abstract: To investigate the shear performance of sleeved stud connectors, 8 stud push-out specimens were designed, and static loading tests were conducted to evaluate the mechanical performance. The shear performance differences between the novel sleeved studs and conventional welded studs were compared. Referring

to the experimental results, an Abaqus nonlinear finite element model was developed to study the shear mechanism of sleeved stud connectors. The experimental results indicated that the ultimate shear bearing capacity and shear stiffness of the sleeved stud connectors are higher than those of ordinary welded studs, and the maximum slip is relatively small. Compared to conventional welded studs, the ultimate bearing capacity of sleeved studs increases by 4% to 8%, and the shear stiffness increases by 25% to 35%. Finite element analysis shows that the shear failure process of sleeved stud connector is similar to novel sleeved stud connector, but the failure range and stud stress of sleeved stud connector is smaller than that of novel sleeved stud connector. The concrete failure of the sleeved stud connector occurs inside the sleeve, while the concrete outside the sleeve is not damaged. Experimental and numerical analysis have shown that the mechanical properties of the sleeved stud connector are better than those of novel sleeved stud connector. It is feasible to design and calculate sleeved stud connector according to the method of novel sleeved stud connector.

Keywords: connectors; composite beams; sleeve; welded studs; experimental study; finite element analysis

为了解决连续组合梁桥负弯矩区的混凝土桥面板开裂问题, 在组合梁负弯矩区采用后结合预应力技术是一种行之有效的方法。后结合连续组合梁桥是指组合梁桥在施工负弯矩区暂时不将混凝土桥面板与钢梁结合, 在张拉完负弯矩区混凝土桥面板的预应力筋后, 再将混凝土桥面板与钢梁结合起来, 最后把正负弯矩区的混凝土桥面板连接为整体的施工方法。在组合梁中采用焊钉连接件把钢梁与混凝土

收稿日期: 2024-04-22

基金项目: 福建省交通运输科技项目(2021Y038); 河南省重点研发专项项目(231111241500)

第一作者: 吴 飞, 博士生, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁。E-mail: 1910392@tongji.edu.cn

通信作者: 苏庆田, 教授, 主要研究方向为钢与组合结构桥梁。E-mail: sqt@tongji.edu.cn



论文
拓展
介绍

桥面板结合起来,焊钉是组合梁中关键的传力构件。

后结合组合梁中的连接件通常采用群钉连接的方式。组合梁桥中群钉连接件的应用从瑞士开始^[1],目前已有许多学者通过试验及有限元方法研究了群钉连接件连接件的受力性能。Shim等^[2-3]通过推出试验研究了群钉连接构造的疲劳性能及极限承载力。Ryu等^[4-5]通过足尺模型试验测试了预制混凝土板的抗裂性能,并将试验结果与Eurocode 4推荐的公式进行了对比。Okubo^[6],苏庆田^[7],刘永健^[8],项贻强等^[9]通过推出试验测试了群钉连接件的抗剪刚度和抗剪承载能力。Wang等^[10]通过推出试验对比研究了采用不同群钉孔形状的群钉剪力-滑移曲线和破坏模式的异同。Xu等^[11]通过静力推出试验和有限元参数分析研究了群钉连接件在弯剪耦合作用下的力学性能,分析了横向弯矩引起的混凝土开裂对群钉抗剪刚度和抗剪承载力产生的折减。组合梁中采用群钉连接方式安装桥面板时经常会遇到桥面板钢筋与焊钉位置冲突,现场切割焊钉是常用的方法,这降低了组合梁的焊钉连接性能。

若后结合预应力组合梁采用预制桥面板,可在混凝土桥面板预制过程中提前设置预留群钉孔,钢梁对应于预留群钉孔位置处焊接群钉连接件。但若后结合预应力组合梁采用现浇桥面板,工程现场常需使用一次性木模板作为群钉孔内模,但内模拆除工序耗时耗力,模板拆除不完全还会对组合梁受力产生不良影响。为解决该问题,学者提出了钢套筒群钉连接件的概念。钢套筒群钉连接件的施工方法为:在桥面板钢筋施工完成后、混凝土浇筑前将金属波纹套筒套在焊钉外作为混凝土浇筑的内模(图1),防止混凝土在浇筑过程中和焊钉根部连为一体;当混凝土达到规定强度后张拉预应力钢束使得混凝土桥面板产生压应力;待预应力施加完毕后采用高强砂

浆或者超高性能混凝土(UHPC)填充钢套筒从而使混凝土桥面板和钢主梁形成可靠的连接。

套筒焊钉连接件与传统的焊钉连接件在结构上不同,套筒焊钉连接件的受力性能的研究还未见报道,其是否能够实现组合梁中钢梁与混凝土板之间的传力值得研究。为此本文通过对套筒焊钉连接件开展试验和数值研究,探究了套筒焊钉连接件的受力性能和破坏机理,论证这种新型连接件形式在组合梁中使用的安全性。

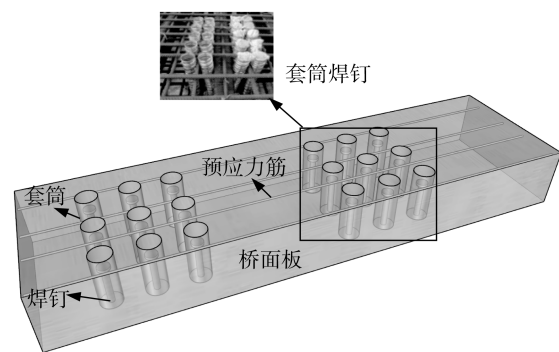


图1 钢套筒群钉连接件构造

Fig. 1 Sleeved cluster stud connector

1 套筒焊钉连接件的抗剪试验

1.1 试件设计

试验设计了8个焊钉推出试件,试件的基本特征见表1,构造如图2所示。由于套筒焊钉试件的施工工艺较复杂,试件抗剪性能受波纹管安装、灌浆饱满度等因素影响。为避免个别试件制作误差影响整体结果,试验多制作了两个套筒焊钉试件,即5个套筒焊钉试件以及3个常规焊钉试件。通过对推出试件进行测试,得到新型焊钉连接件和传统焊钉连接件的抗剪性能差异。

表1 试件分组

Tab. 1 Classification of test specimens

试件编号	焊钉规格 直径×高度/(cm× mm)	焊钉布置形式 (单侧)	套筒规格 直径×长度/(cm×mm)	套筒内部灌浆料	试件数量 /个
SN12	22×200	1×2	6×320		3
SS12	22×200	1×2		UHPC	5

各试件混凝土采用C60混凝土,钢筋采用直径20 mm的HRB400。套筒使用直径6 cm,厚度0.35 mm,长度320 mm的金属波纹套筒,焊钉统一使用直径22 cm,高200 mm的ML15圆柱头焊钉,套筒内部的灌浆料均使用超高性能混凝土(UHPC)。试件的部分加工制作主要步骤如图3所示。

1.2 加载方案

采用YAJ-10000微型控制电液伺服压剪试验机对试件顶部的钢结构进行加载。试件在正式加载前按照20%的预估荷载做3遍预加载,正式加载时以60%的预估荷载作为分界线,前半段采用力加载模式,加载速率为 $5 \text{ kN}\cdot\text{s}^{-1}$,后半段采用位移加载模

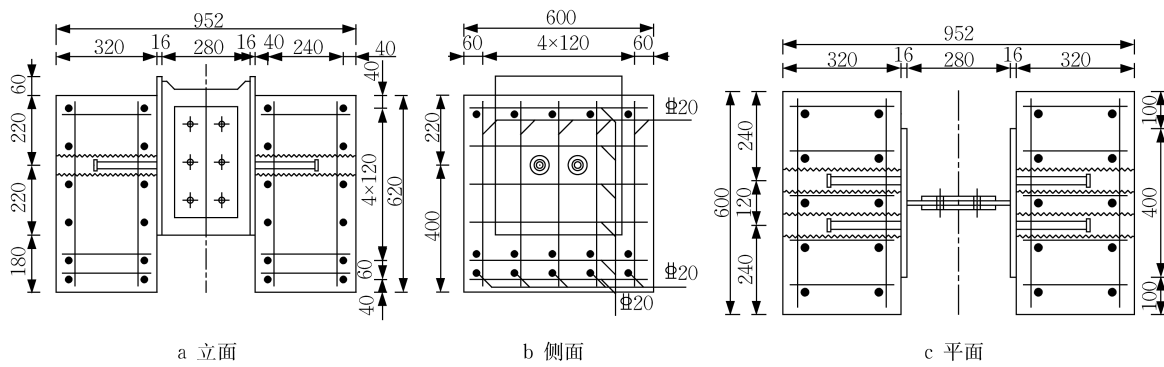


图 2 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 2 Configurations of test specimen (unit: mm)

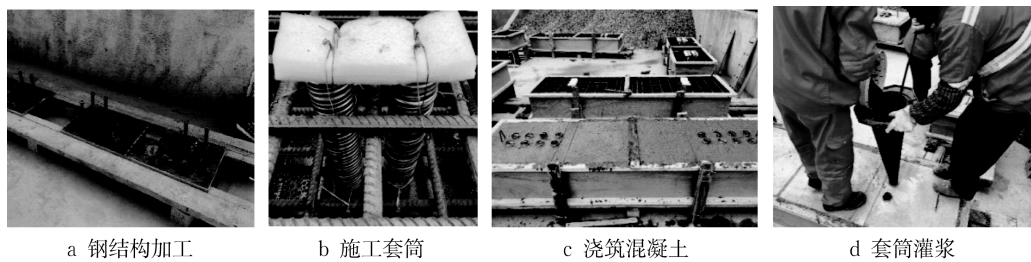


图 3 试件加工制作

Fig. 3 Fabrication process of test specimen

式,加载速率为 $0.5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 。在单排焊钉试件的钢混界面周围布置 4 个位移计,用于测试焊钉根部和混凝土板的相对滑移。试件测点布置及加载装置如图 4 所示。

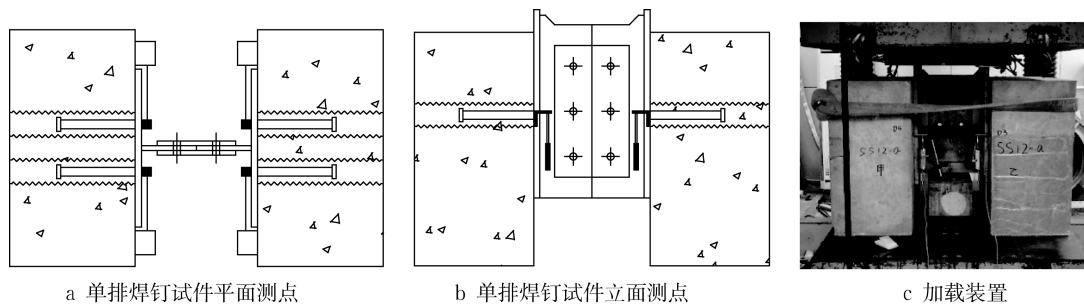


图 4 测点布置及加载装置

Fig. 4 Layout of measurement point and loading device

1.3 材料性能

本试验测得所用 C50 普通混凝土和 UHPC 的立方体抗压强度分别为 53.2、136.8 MPa,轴心抗压强度分别为 39.9、129.2 MPa,弹性模量分别为 35 770 和 44 000 MPa。

所有 ML15 焊钉的屈服强度为 367 MPa,抗拉极限强度为 486 MPa,弹性模量为 207 000 MPa。

2 测试结果及分析

2.1 破坏模式

图 5 分别展示了常规焊钉推出试件和新型套筒

焊钉推出试件的典型破坏模式,所有试件都是焊钉根部被剪断,焊钉根部的混凝土局部压溃。从图中可以看出,套筒焊钉根部的 UHPC 露出了部分钢纤维,同时焊钉下方的钢套筒也被挤压破碎。由于焊钉根部的 UHPC 强度更高,套筒焊钉根部的混凝土破坏范围比常规焊钉的略微小一些,相比常规焊钉,套筒焊钉主要在根部受到直接剪切的作用,受弯剪耦合的作用更小,具有更优越的抗剪性能。

2.2 荷载位移曲线

图 6 展示了推出试验的荷载滑移曲线,水平坐标轴代表的是每个试件的平均滑移量,竖向坐标轴代表每个试件中平均每根焊钉受到的剪切荷载。套

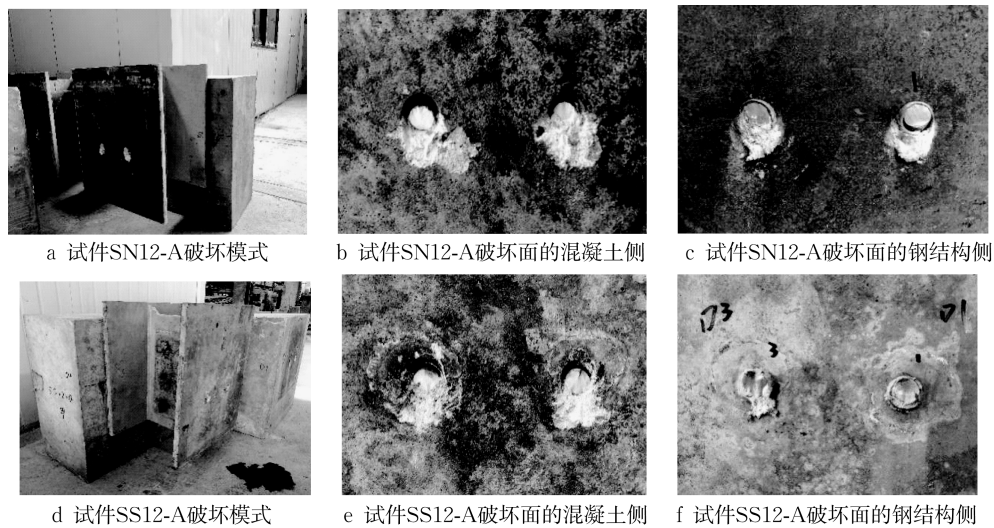


图 5 推出试件破坏模式

Fig. 5 Failure modes of ordinary stud specimen

筒焊钉的荷载滑移曲线变异性比常规焊钉略大, 主要是因为浇筑混凝土时, 金属波纹套筒受到冲击作用, 焊钉难以处于套筒的中心位置。图 6c 明显地反映出两种焊钉的抗剪性能差异, 新型套筒焊钉的极限抗剪承载力和抗剪刚度都高于普通的常规焊钉, 且达到极限承载力产生的滑移量也相对较小。

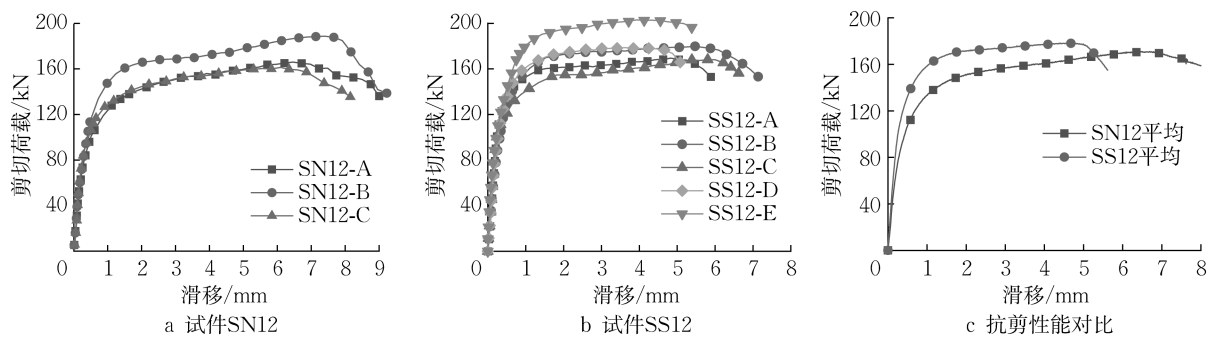


图 6 推出试验荷载滑移曲线

Fig. 6 Load-slip curves in push-out tests

2.3 试验结果分析

将各个试件的测试结果汇总于表 2, V_u 代表焊钉的极限抗剪承载力, S_p 表示极限抗剪承载力对应的滑移, $K_{0.2mm}$ 、 $K_{1/3}$ 和 $K_{1/2}$ 表示焊钉的抗剪刚度, 分别按照滑移 0.2 mm、 $1/3V_u$ 和 $1/2V_u$ 对应的割线模量取值。表中列出了各试件的抗剪性能变化幅度 (以 SN12 试件为基准)。计算可得新型套筒焊钉的极限抗剪承载力比常规焊钉增加 4.5%, 极限滑移量减小 27.7%, 说明新型套筒焊钉的抗剪承载力与普通焊钉的抗剪承载力基本接近; 但是抵抗滑移变形的能力较强, 抗剪刚度 $K_{0.2mm}$ 、 $K_{1/3}$ 、 $K_{1/2}$ 比常规焊钉分别提高了 31.9%、38.7%、47.8%, 主要原因是在新型套筒焊钉连接的套筒内填充 UHPC, UHPC 的强度和弹性模量均比普通混凝土的高, 对焊钉的约

束更强使得焊钉在根部的变形更小, 从而使得套筒焊钉连接件的抗剪刚度较大。

3 数值模拟

3.1 建模方法

由于试验只能得到焊钉连接件的抗剪承载力和变形情况, 无法得到在荷载变化过程中连接件内部的受力情况。为了进一步分析新型套筒焊钉的抗剪性能, 参照试验试件建立了 Abaqus 有限元模型。考虑到推出试件的对称性, 只建立试件四分之一的有限元模型, 模型如图 7 所示。模型包含了混凝土块、钢套筒、钢结构、钢筋网片和焊钉, 其中混凝土块由两种不同的材料组成, 套筒内部为 UHPC 超高性能

混凝土,套筒外部为普通的C50混凝土。

表 2 推出试验结果汇总

Tab. 2 Summarization of push-out test results

组号	编号	极限抗剪承载力 V_u /kN		极限抗剪承载力对应的滑移 S_p /mm		抗剪刚度 $K_{0.2mm}/(kN \cdot mm^{-1})$		抗剪刚度 $K_{1/3}/(kN \cdot mm^{-1})$		抗剪刚度 $K_{1/2}/(kN \cdot mm^{-1})$	
SN12	A	166.8		6.45		312		327		247	
	B	189.7	平均:	7.45	平均:	331	平均:	321	平均:	266	平均:
	C	161.3	172.6	6.90	6.67	342	329	351	333	313	272
SS12	A	169.7		4.59		444		422		429	
	B	180.0		5.09		370		387		331	
	C	168.7	平均:	5.90	平均:	455	平均:	457	平均:	446	平均:
	D	179.1	180.3	4.20	4.82	424	434	456	462	398	402
	E	203.8		4.34		477		629		434	

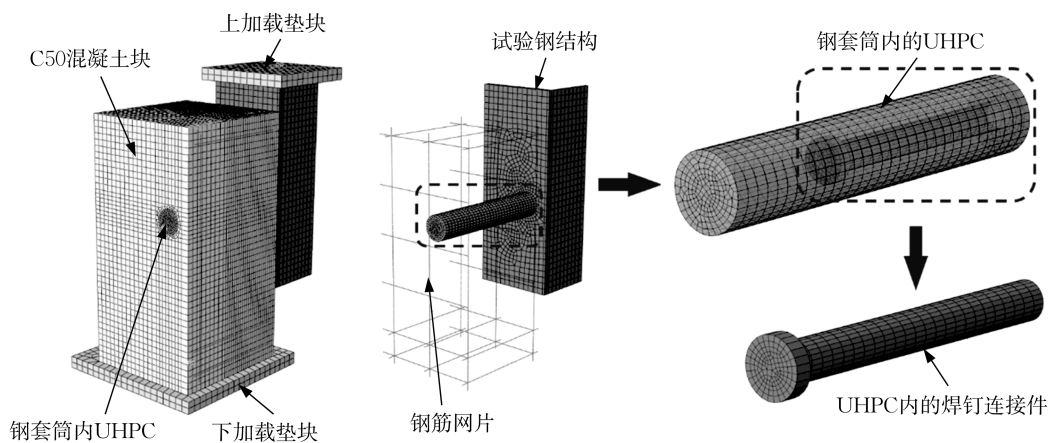


图 7 推出试验有限元模型

Fig. 7 FE model of push-out tests

试件的混凝土块、焊钉以及钢梁都采用C3D8R实体单元,钢筋采用T3D2桁架单元,试件总体的单元尺寸为15 mm,为了提高计算精度,焊钉周围的混凝土单元和钢梁单元局部加密至3 mm。

模型采用面-面接触模拟钢混结合面、C50-UHPC和UHPC-焊钉之间的接触,其中切向接触用罚函数摩擦公式模拟,法向接触用硬接触模拟。钢筋与混凝土之间采用embedded命令约束,上下刚体基座分别与试件接触的表面采用Tie命令约束。

3.2 材料本构

(1)混凝土本构

在Abaqus有限元分析软件中,混凝土的轴心抗压和抗拉的应力应变关系可以用塑性损伤模型(CDP模型)模拟,CDP模型中的损伤因子基于Mander^[12]提出的能量等价原理。C50混凝土非线性本构模型采用如图8所示的应力应变($\sigma - \epsilon$)曲线。

(2)UHPC本构

UHPC本构模型的输入方法与C50混凝土相同,本构曲线如图9所示。

(3)钢材本构

焊钉材料的应力应变曲线采用图10所示的三折线模型。钢材和钢筋的应力应变曲线采用理想弹塑性模型,钢筋屈服强度为400 MPa,对应应变为0.00194;钢板屈服强度为345 MPa,对应应变为0.00168。

3.3 模型验证

数值模拟得到的荷载-滑移曲线与推出试验的对比结果如图11所示。

模拟曲线与试验曲线符合良好,由于未考虑焊钉材料损伤,套筒焊钉连接件在弹性阶段相差不大,在非弹性阶段有所偏差。这些差异很大程度上来源于套筒偏位、底部漏浆、焊接质量等外部因素。

4 受力机理

4.1 焊钉的受力与变形

为了研究套筒焊钉连接件在加载过程中钉身的应力分布情况,提取模型SS12和SN12中焊钉上下

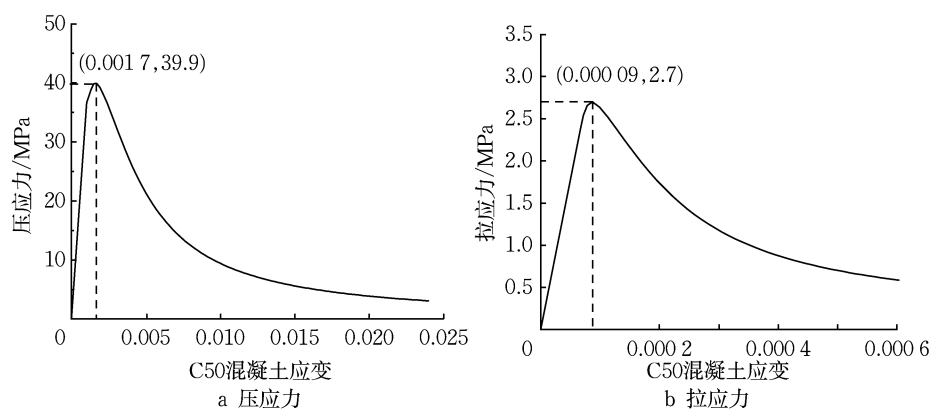


图 8 C50 普通混凝土的本构模型

Fig. 8 Constitutive models of C50 ordinary concrete

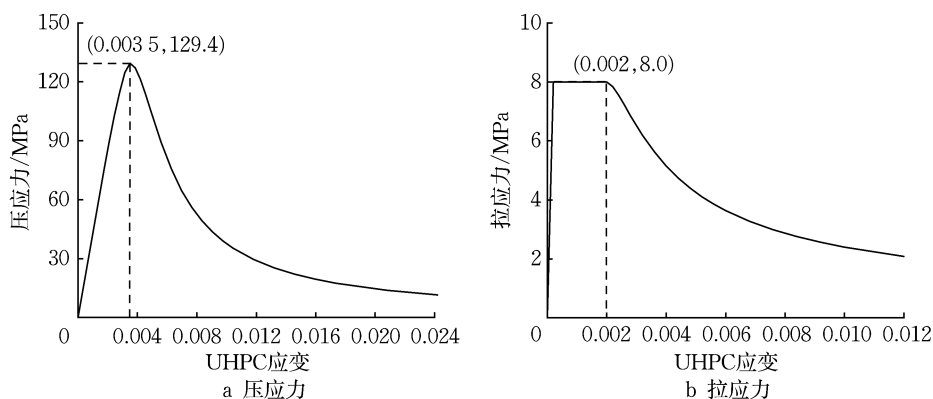


图 9 UHPC 的本构模型

Fig. 9 Constitutive model of UHPC

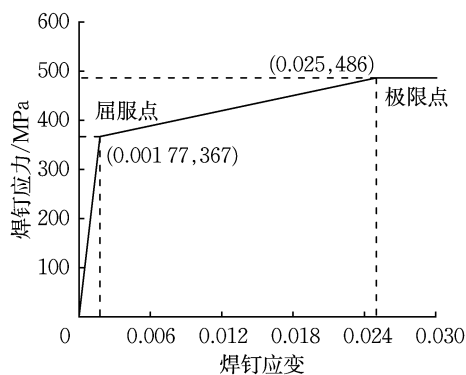


图 10 焊钉的本构模型

Fig. 10 Constitutive model of welded studs

缘的正应力如图 12 所示。焊钉上下缘正应力基本对称。焊钉上缘在根部位置处受到压应力,但是随着距焊钉根部距离逐渐增加,压应力急剧减小,在 15 mm 附近由受压转变成受拉,然后在 35 mm 附近达到拉应力峰值,之后缓慢下降,在 95 mm 附近接近于 0。焊钉下缘的正应力分布规律与上缘相反,两者的差值能够反映焊钉的受弯情况,从图中可以看出,焊钉上下缘的正应力在高度 95 mm 以后趋于相同数

值,说明焊钉纵向的受力特点是在距离根部 95 mm 内以受弯为主,在 95 mm 外只承担轴拉作用。

进一步比较两种焊钉连接件在不同加载阶段的正应力分布。当剪切荷载只有 50% V_u 时,两种焊钉的正应力差异不大,套筒焊钉的正应力略微小于常规焊钉。但是当剪切荷载达到 90% V_u 时,两种焊钉的正应力在距离根部 15 mm 以内差异很大,套筒焊钉的正应力比常规焊钉小约 30%~40%,说明根部受弯的程度更弱,与试验现象相符。此外,两种焊钉在高度 15 mm 上的应力分布及应力峰值基本相同。

推出试验过程中焊钉根部的受力情况非常复杂,除了有受弯和受拉产生的正应力,还有直接剪切作用产生的剪应力,图 13 提取了焊钉中心线位置的剪应力。

从图中可以看出,两种焊钉的剪应力分布基本相同,剪应力峰值都出现在焊钉根部,最大值约为 280 MPa。焊钉在距离根部 35 mm 范围内由焊钉下缘混凝土提供抗剪支承,在距离根部 35~95 mm 范围内由焊钉上缘混凝土提供抗剪支承,焊钉的弯曲

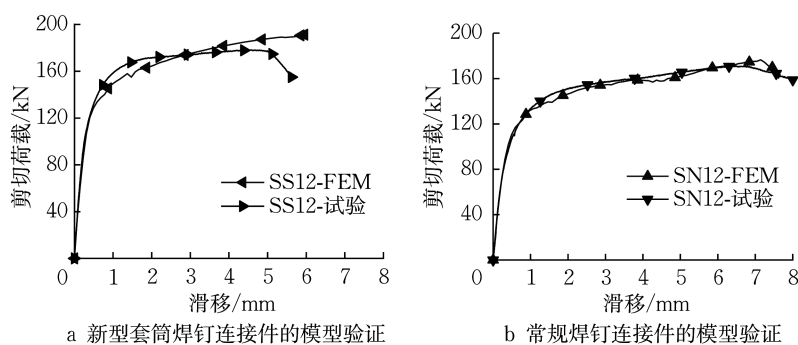


图 11 数值模拟的焊钉连接件荷载-滑移关系

Fig. 11 Comparison of numerical and experimental load-deflection curves

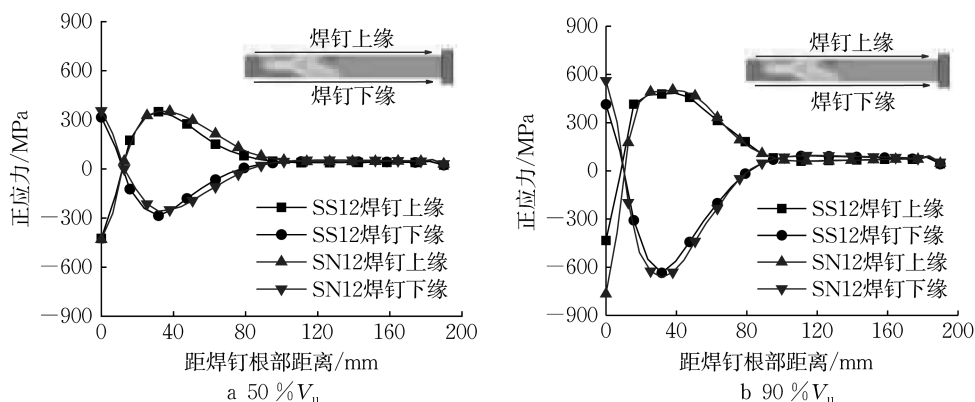


图 12 焊钉正应力分布

Fig. 12 Axial stress distribution of welded studs

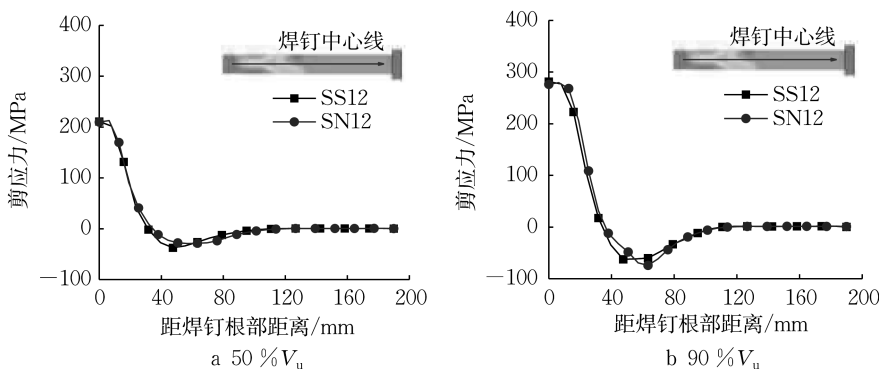


图 13 焊钉剪应力分布

Fig. 13 Shear stress distribution of welded studs

变形发生在距离焊钉根部 95 mm 范围内。与常规焊钉相比,套筒焊钉的反向剪力峰值更靠近焊钉根部,说明套筒焊钉直接剪切作用更加明显,也印证了试验中套筒焊钉的根部弯曲变形范围更小。

图 14 为焊钉在不同加载阶段下的竖向变形图。焊钉的竖向变形在根部最大,然后随着根部距离逐渐增加而减小,在距离根部 75 mm 之后趋近于零。比较两种焊钉的变形情况发现,在相同加载阶段下,套筒焊钉的整体变形更小,抗剪刚度也更高。

4.2 抗剪传力机理分析

试件 SN12 及试件 SS12 在剪切荷载为 50 % V_u 时,焊钉及混凝土沿径向的 Mises 应力分布如图 15 所示。

由图可知试件 SN12 在焊钉中心位置的应力相比试件 SS12 较小,但两个试件在焊钉下缘的应力几乎相同。由于焊钉与混凝土弹性模量相差较大,在焊钉边缘的接触面上有较为明显的应力突变现象。试件 SN12 及试件 SS12 在与焊钉接触的混凝土部位

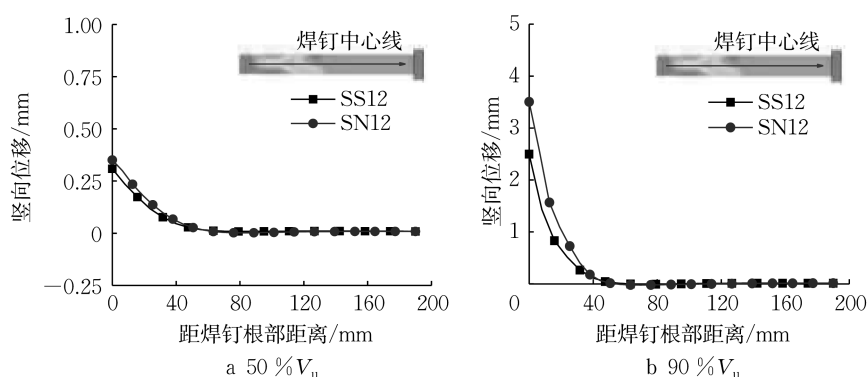


图 14 焊钉竖向变形分布

Fig. 14 Vertical displacement distribution of welded studs

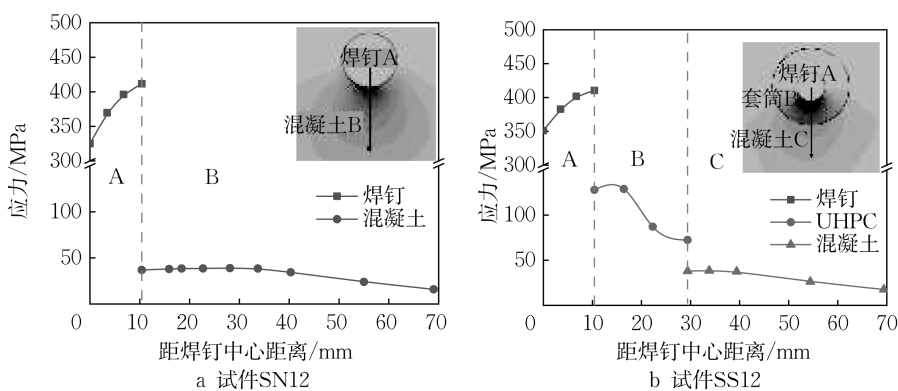


图 15 推出试件应力分布图

Fig. 15 Stress distribution of push-out tests

均分别达到了普通混凝土及UHPC混凝土的抗压强度。试件SN12及SS12的混凝土应力分别在距离焊钉中心30、15 mm后才开始下降。由于UHPC混凝土弹性模量较大,试件SS12的应力下降速度明显较试件SN12为快。在试件SS12中,由于两种混凝土的弹性模量差异,在两种混凝土的接触面上出现了第二次突变。第二次突变过后,两个试件的混凝土应力差距不大。

5 结语

本文通过对新型套筒焊钉连接件进行推出试验和数值模拟,比较了套筒焊钉与常规焊钉的抗剪性能差异,得到的结论如下:

(1)套筒焊钉和常规焊钉的破坏模式均为焊钉根部剪断,其中套筒焊钉根部附近的混凝土破坏范围较小,且焊钉杆根部的弯曲变形小于常规焊钉,表明套筒焊钉受到直接剪切的作用更大,受弯剪耦合效应的影响更小。

(2)推出试验和数值模拟都证实了套筒焊钉的

极限抗剪承载力和抗剪刚度高于普通的常规焊钉,而且达到极限承载力产生的滑移量也相对较小。与常规焊钉相比,套筒焊钉在提高抗剪强度方面的优势不明显,极限承载力仅提升4%~8%,但是抵抗滑移变形的能力较强,抗剪刚度提升25%~35%。

(3)焊钉在根部附近由焊钉下缘混凝土提供抗剪支承,其余部位由焊钉上缘混凝土提供抗剪支承。与常规焊钉相比,套筒焊钉的反向剪力峰值更靠近焊钉根部,说明套筒焊钉直接剪切作用更加明显。

(4)由于弹性模量差异,试件SN12及试件SS12分别存在一次、两次应力突变。剪切荷载为50% V_u 时,两个试件与焊钉接触的混凝土部位分别达到了普通混凝土及UHPC混凝土的抗压强度。由于UHPC混凝土弹性模量较大,试件SS12的混凝土应力下降速度明显较试件SN12为快。在第二次应力突变过后,两个试件的混凝土应力大小趋于一致。

作者贡献声明:

吴 飞:具体研究工作的开展和论文撰写。

苏 航:论文撰写及修改。

苏庆田:论文的选题、指导及修改。

林志平:负责论文思路的把控。

刘新华:负责论文试验试件制作。

参考文献:

- [1] 刘玉擎. 组合结构桥梁[M]. 北京: 人民交通出版社, 2005.
LIU Yuqing. Combined structural bridges [M]. Beijing: China Communications Press, 2005.
- [2] SHIM C S, LEE P G, CHANG S P. Design of shear connection in composite steel and concrete bridges with precast decks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2001, 57 (3): 203.
- [3] SHIM C S, CHANG S P. Cracking of continuous composite beams with precast decks [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2003, 59(2): 201.
- [4] RYU H K, CHANG S P, KIM Y J, *et al.* Crack control of a steel and concrete composite plate girder with prefabricated slabs under hogging moments [J]. Engineering Structures, 2005, 27(11): 1613.
- [5] RYU H K, KIM Y J, CHANG S P. Crack control of a continuous composite two-girder bridge with prefabricated slabs under static and fatigue loads [J]. Engineering Structures, 2007, 29(6): 851.
- [6] OKUBO N, KURITA A, KOMATSU K, *et al.* Experimental study on static and fatigue characteristics of grouped stud [J]. Japanese Journal of Structural Engineering, 2002, 48(A): 1391.
- [7] 苏庆田, 李雨. 高强度砂浆群钉连接件抗剪承载力试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(5): 699.
SU Qingtian, LI Yu. Shear capacity of grouped stud connector embedded by high strength mortar [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(5): 699.
- [8] 杨岳华, 刘永健. 群钉连接件推出试验及塑性分析[J]. 桥梁建设, 2013, 43(4): 80.
YANG Yuehua, LIU Yongjian. Push-out tests and plastic analysis of group stud connectors [J]. Bridge Construction, 2013, 43(4): 80.
- [9] 项贻强, 郭树海. 复杂应力条件下快速施工钢-混组合梁群钉推出试件参数分析[J]. 中国公路学报, 2017, 30(3): 246.
XIANG Yiqiang, GUO Shuhai. Parameter analysis of push-out specimens with different group studs in accelerated bridge construction steel-concrete composite beams under complicated stress condition [J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(3): 246.
- [10] WANG Yuhang, YU Jie, LIU Jiepeng, *et al.* Shear behavior of shear stud groups in precast concrete decks [J]. Engineering Structures, 2019, 187(15): 73.
- [11] XU Cheng, SUGIURA Kunitomo. Analytical investigation on failure development of group studs shear connector in push-out specimen under biaxial load action [J]. Engineering Failure Analysis, 2014, 37: 75.
- [12] MANDER J B, PRIESTLEY M J N, PARK R, *et al.* Theoretical stress-strain model for confined concrete [J]. Journal of Structural Engineering, 1988, 114(8): 1804.