

DOI:10.20035/j.issn.1671-2668.2025.01.017

引用格式:王达,杨俊鑫,石佳林,等.钢-UHPC组合梁栓钉的群钉效应研究[J].公路与汽运,2025,41(1):84-92.

Citation:WANG Da,YANG Junxin,SHI Jialin,et al.Study on group nailing effect of steel-UHPC composite beam bolts[J].Highways & Automotive Applications,2025,41(1):84-92.

钢-UHPC组合梁栓钉的群钉效应研究*

王达^{1,2},杨俊鑫¹,石佳林²,谭本坤¹

(1.长沙理工大学 土木工程学院,湖南 长沙 410114;2.中南林业科技大学 土木工程学院,湖南 长沙 410004)

摘要:建立考虑焊缝的钢-UHPC组合梁推出试件精细化有限元模型,在验证模型准确性与有效性的基础上,通过变化模型中栓钉数量及间距,分析群钉效应对钢-UHPC组合梁中栓钉抗剪性能的影响。结果表明,栓钉间距在250 mm以内时,不同位置栓钉皆受到群钉效应的影响;栓钉间距 d 与栓钉直径 r 之比 $d/r \geq 7.69$ 时,弹性阶段栓钉截面剪力与有效抗剪高度由加载端栓钉S-1向UHPC板底部栓钉S-6逐渐增大,传力不均匀系数呈上升的抛物线形式,栓钉S-1、S-6的剪力极值分别为单钉的5.83%~16.53%、71.92%; $d/r \geq 7.69$ 时,塑性阶段栓钉截面剪力与有效抗剪高度基本稳定,传力不均匀系数呈直线形式,栓钉S-1、S-6的剪力极值分别为单钉的88.66%、86.88%; $d/r < 7.69$ 时,栓钉S-1几乎不参与结构抗剪,弹性阶段、塑性阶段的剪力分别为单钉的5.83%、20.00%,有效抗剪高度分别为5 mm、7 mm,传力不均匀系数降至0.57,栓钉间UHPC板出现贯穿性损伤。

关键词:桥梁;钢-UHPC组合结构;栓钉;群钉效应;不均匀系数;抗剪承载力;有效高度

中图分类号:U441.5

文献标志码:A

文章编号:1671-2668(2025)01-0084-09

随着桥梁建设的快速发展,钢-混组合结构桥梁应用越来越广泛^[1]。为解决钢桥面板开裂和沥青铺装层损坏等问题,超高性能混凝土(Ultra-high Performance Concrete, UHPC)以其高弹性模量、高韧性、高强度等优势逐渐应用于钢-混组合结构中^[2-4]。栓钉是钢-UHPC组合梁中的重要构件,不仅承受由UHPC板传递至钢桥面板的剪力,还能防止UHPC板与钢桥面板之间发生竖向掀起现象^[5-8]。李聪等对6个钢-UHPC组合梁中栓钉进行推出试验,发现栓钉的破坏形式为根部焊缝处剪断,最大滑移量小于3.5 mm,UHPC板在靠近栓钉的局部区域发生破损,焊缝对栓钉抗剪性能的贡献较大,若不予以考虑,计算值会偏于保守^[9]。李萌等以栓钉直径、加载方式、界面处理为试验参数进行9组静力推出试验,并利用ABAQUS有限元模型分析焊缝形式、栓钉高度与直径、UHPC强度对UHPC中栓钉抗剪性能的影响,发现栓钉直径与焊缝形式对栓钉抗剪性能的影响最大,呈线性正相关关系^[10]。童忠

国通过5组推出试验对不同直径和高度的栓钉进行分析,发现栓钉具有很强的脆性,栓钉直径对其抗剪性能的影响远大于栓钉高度的影响^[11]。胡文旭等建立考虑栓钉焊缝影响的钢-UHPC组合板推出试件的精细化有限元模型,分析栓钉与UHPC的相互作用机制及试件的受力全过程行为,研究栓钉直径和间距对钢-UHPC组合板抗剪性能的影响,发现栓钉直径增大和间距减小会导致UHPC板开裂甚至损坏,考虑焊缝时栓钉抗剪承载力与试验结果更吻合^[12]。周绪红等通过有限元分析研究钢锚箱中栓钉的群钉效应,发现群钉效应会导致栓钉的抗剪性能显著降低,造成栓钉的轴向应力发生变化^[13]。陈英等通过对以往试验数据进行有限元分析,研究了群钉效应对大直径栓钉抗剪性能的影响^[14]。目前对钢-UHPC组合梁中栓钉的推出试验研究较少,且研究内容集中于UHPC强度、栓钉直径与高度、界面处理等影响因素,对钢-UHPC组合梁中栓钉的群钉效应影响研究较少。本文以文献[11]中

* 基金项目:国家自然科学基金资助项目(52278235);湖南省科技计划创新项目(2020RC4049);长沙理工大学专业学位研究生“实践创新与创业能力提升计划”项目(CLSJXC22056)

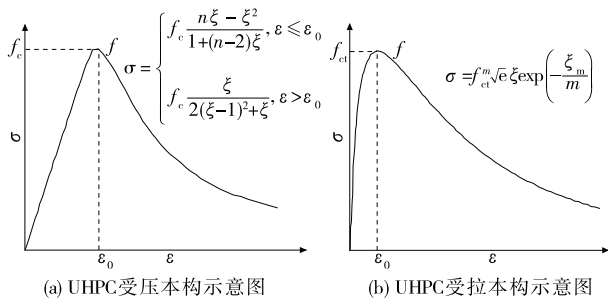
推出试验为原型,建立考虑焊缝的有限元模型,通过变化有限元模型中栓钉数量及间距,分析群钉效应对钢-UHPC 组合梁中栓钉抗剪性能的影响。

1 有限元模型

1.1 有限元模型建立

为深入分析钢-UHPC 组合梁中栓钉群钉效应对栓钉抗剪性能的影响,基于文献[11]中 5 组推出试验试件,建立 ABAQUS 精细化有限元模型。推出试件的 UHPC 板厚为 50 mm,长×宽为 500 mm×400 mm;H 形钢腹板长 550 mm,宽 200 mm,厚 8 mm;翼缘宽 200 mm,厚 12 mm,与混凝土接触面为 450 mm;型钢两侧各焊接 2 根栓钉并置于同一水平上,栓钉直径为 13 mm、16 mm、19 mm,高度为 35 mm、40 mm、45 mm。为防止混凝土与钢梁之间的摩擦影响试验结果,在混凝土与钢板的接触面涂抹润滑油减小摩擦力。UHPC 的抗压强度与抗拉强度分别为 133.0 MPa、13.3 MPa,弹性模量为 462.2 GPa。

考虑到材料本构的非线性及材料之间的接触关系,UHPC 受压本构关系参考文献[15],受拉本构关系参考文献[16](见图 1)。栓钉与工字钢本构关系采用三折线模型,相关参数见表 1。为在保证计算精度的同时控制时间成本,在有限元模型对称面施加对称约束将模型简化为原试件的 1/4;在工字形钢板加载端添加参考点 A 与实际加载面进行绑定,同时施加 Y 轴方向位移约束的边界条件,并对 UHPC 端部施加固定约束以实现加载;UHPC 与栓钉、工字钢之间的相互作用采用切向摩擦中罚函数方程与法向硬接触,栓钉与 UHPC 的摩擦因数为



σ 为 UHPC 的应力; f_c 、 f_t 分别为 UHPC 的抗压强度、抗拉强度; ϵ 、 ϵ_0 分别为 UHPC 的应变和峰值应变; $n=E/E_0$; E 、 E_0 分别为 UHPC 的弹性模量、峰值点的割线模量; $\xi=\epsilon/\epsilon_0$; $m=0.85-0.47K+0.12K^2$, $0<K\leq 3$; K 为钢纤维增强因子, $K=(l_f/d_f)V_f$; l_f 、 d_f 、 V_f 分别为钢纤维的长度、直径、体积率

图 1 UHPC 材料本构曲线

表 1 钢构件的材料属性

材料	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	泊松比
ML15 栓钉	210	345	405	0.3
Q345 钢板	210	345	470	0.3

0.3,考虑到 UHPC 与工字钢之间进行了涂油处理,摩擦因数设置为 0.0。

1.2 有限元模型验证

以往研究表明,栓钉的焊缝对栓钉抗剪性能影响显著,尤其是对于 UHPC 板中的栓钉,焊缝能极大提高栓钉的抗剪性能,抗剪承载力最大提升 93%。因此,对考虑焊缝与不考虑焊缝的栓钉抗剪承载力进行对比分析。图 2 为栓钉有限元模型及边界条件示意图,表 2 为 GB/T 10433—2002《电弧螺柱焊用圆柱头栓钉》^[17]中焊缝尺寸指导值。有限元模型共划分为 61 959 个单元、84 612 个节点,对远离栓钉区域的网格划分尺寸采用 10 mm,距离栓钉较近的 UHPC 板与工字钢采用 5 mm 网格进行划分,焊缝、栓钉及与栓钉近距离接触的局部构件采用更精细的网格划分,其中焊缝网格尺寸为 1 mm,栓钉网格尺寸为 2 mm。

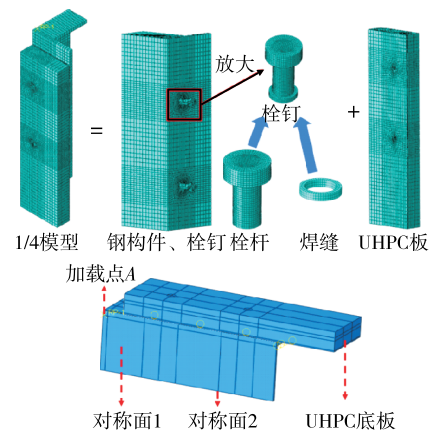


图 2 栓钉有限元模型及边界条件示意图

表 2 GB/T 10433—2002 中栓钉焊缝规格指导值

公称直径 r /mm	栓钉高度 h /mm	栓钉间距 d /mm	h/d
13	3.0	17	0.18
16	4.5	21	0.21
19	6.0	23	0.26
22	6.0	29	0.21
25	7.0	31	0.23

表 3 为文献[11]中 5 组推出试验所得栓钉抗剪承载力与有限元计算结果对比。由表 3 可知:推出试验实测值与考虑焊缝的有限元模型的计算值的比值为 0.95~1.08,平均值为 0.98;实测值与不考虑焊缝的有限元模型的计算值相差较大,最大为有限元计算值的 1.52 倍,平均比值为 1.38;栓钉极限滑移

量实测值与有限元计算值的比值为 0.87~0.96,平均值为 0.93,栓钉破坏形式为剪切破坏。可见,焊缝对 UHPC 板中栓钉抗剪性能的影响较大,建立有限元模型时须考虑焊缝对栓钉的影响。通过表 3 数据对比,验证了上述有限元模型的可靠性与精准度,可利用该模型进行后续研究。

表 3 栓钉推出试验结果与有限元计算值对比

试件编号	$P_{\text{test}}/\text{kN}$	$P_{\text{FEA,W}}/\text{kN}$	P_{FEA}/kN	$P_{\text{test}}/P_{\text{FEA,W}}$	$P_{\text{test}}/P_{\text{FEA}}$	$S_{\text{test}}/\text{mm}$	S_{FEA}/mm	$S_{\text{test}}/S_{\text{FEA}}$
UHPC-D13-L30	57.71	59.86	38.09	0.96	1.52	0.91	0.95	0.96
UHPC-D13-L35	58.79	61.49	41.13	0.96	1.43	0.76	0.87	0.87
UHPC-D13-L40	60.43	63.88	46.92	0.95	1.29	0.81	0.86	0.94
UHPC-D16-L40	82.55	76.53	59.67	1.08	1.38	0.84	0.90	0.93
UHPC-D19-L40	114.18	119.72	87.82	0.95	1.30	0.77	0.82	0.94
平均值				0.98	1.38			0.93

注: P_{test} 为推出试验所得栓钉极限荷载; $P_{\text{FEA,W}}$ 为考虑焊缝时有限元计算所得栓钉极限荷载; P_{FEA} 为不考虑焊缝时有限元计算所得栓钉极限荷载; S_{test} 为推出试验所得栓钉极限滑移量; S_{FEA} 为有限元计算所得栓钉极限滑移量。

以上述有限元模型为基础,将栓钉的数量扩展至 6 个,同时采用不同栓钉间距 d 进行差异化对比分析,分析 UHPC 板中栓钉的群钉效应。从加载端至 UHPC 底板对栓钉进行排序,分别编号为 S-1~S-6,栓钉间距 d 分别设置为 50 mm、100 mm、150 mm、200 mm、250 mm。

2 群钉截面剪力分布

在推出试验过程中,栓钉的剪力变化较复杂,如焊缝的存在会使栓钉剪力分布发生变化,栓钉直径增大会使栓钉根部钢板在抵抗弯矩时发生隆起,栓钉高度改变会使栓钉的有效抗剪高度 X_c 发生变化等。为描述群钉效应下 UHPC 板中栓钉的抗剪性能,分别对栓钉处于弹性阶段和塑性阶段时的截面剪应力、有效抗剪高度进行对比,结果见图 3~17。

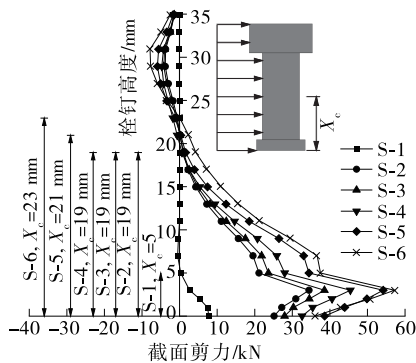


图 3 栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时弹性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

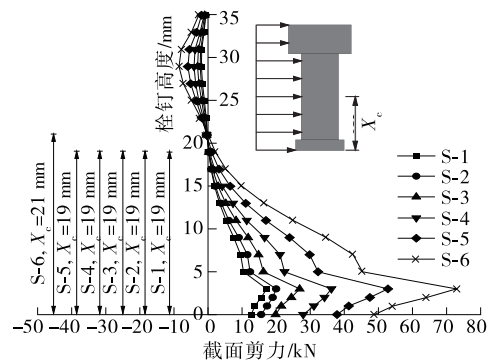


图 4 栓钉间距 $d=100\text{ mm}$ 时弹性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

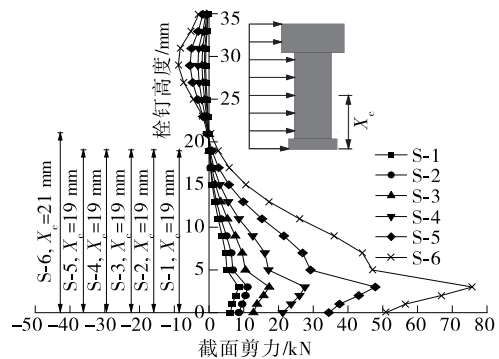


图 5 栓钉间距 $d=150\text{ mm}$ 时弹性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

由图 3~9 可知:栓钉处于弹性阶段时,栓钉根部的焊缝处承受绝大部分剪力,沿栓钉高度方向迅速减小;不同位置栓钉所承受的剪力各不相同,沿加

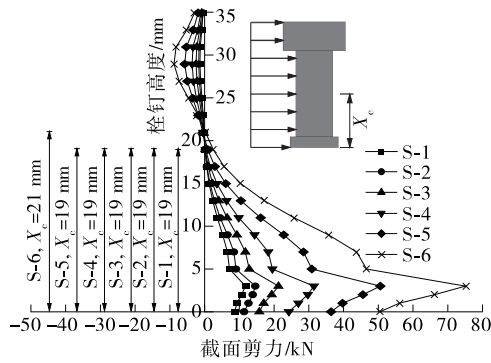


图 6 栓钉间距 $d=200\text{ mm}$ 时弹性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

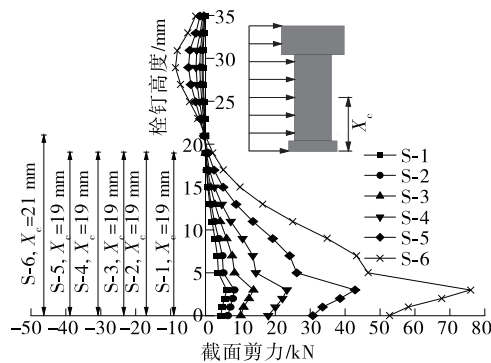


图 7 栓钉间距 $d=250\text{ mm}$ 时弹性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

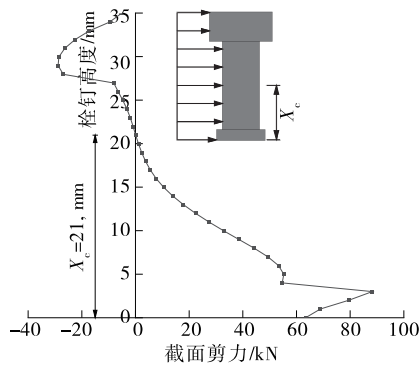


图 8 单钉时弹性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

载端至 UHPC 板底部方向栓钉所承担的剪力逐渐增大,接近 UHPC 板底部的栓钉 S-6 所承受的剪力最大,靠近加载端的栓钉 S-1 所承受的剪力最小。随着栓钉间距 d 的减小,群钉效应愈发明显,甚至在栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时出现位于加载端栓钉 S-1 几乎不参与受力、而靠近 UHPC 板底部的栓钉 S-6 接近屈服状态的现象[见图 9(a)]。栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时,加载端栓钉 S-1 的有效抗剪高度 X_c 仅为 5 mm ,远小于单钉有效抗剪高度 21 mm ,而 UHPC

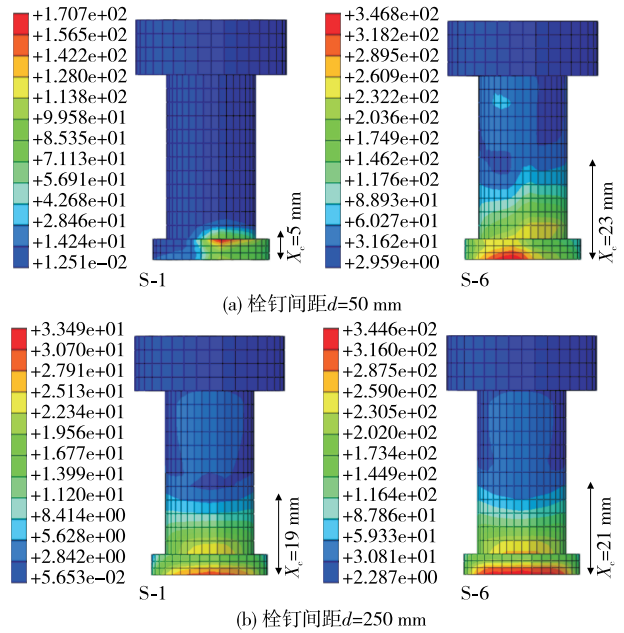


图 9 弹性阶段不同间距下栓钉应力云图(单位:MPa)

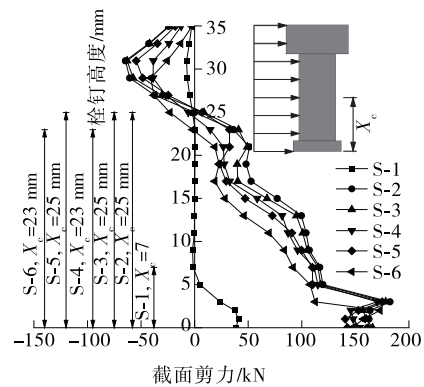


图 10 栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时塑性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

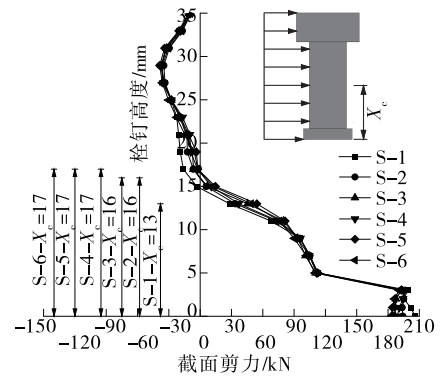


图 11 栓钉间距 $d=100\text{ mm}$ 时塑性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

板底部栓钉 S-6 的有效抗剪高度 X_c 为 23 mm ;随着栓钉间距 d 的增大,加载端栓钉 S-1 开始参与受力[见图 9(b)],其有效抗剪高度 X_c 增长至 19 mm ,

UHPC 板底部栓钉 S-6 的有效抗剪高度 X_c 降至 21 mm, 但不论栓钉间距 d 为何值, UHPC 板底部栓钉 S-6 的有效抗剪高度都高于其余位置的栓钉。

由图 10~17 可知: 栓钉处于塑性阶段时, 不同位置栓钉所承受的剪力基本一致, 但沿栓钉高度方向呈快速减小的趋势, 说明栓钉在抗剪过程中主要由根部起作用, 其中焊缝部位最突出。随着栓钉间

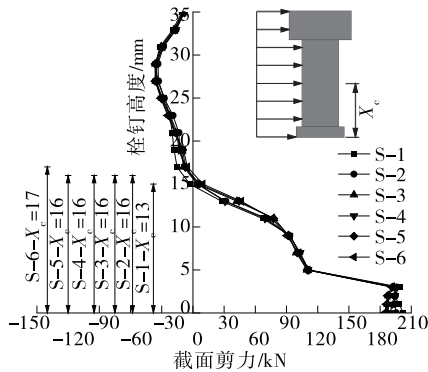


图 12 栓钉间距 $d=150\text{ mm}$ 时塑性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

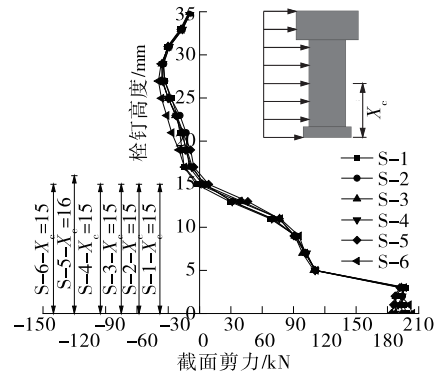


图 14 栓钉间距 $d=250\text{ mm}$ 时塑性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

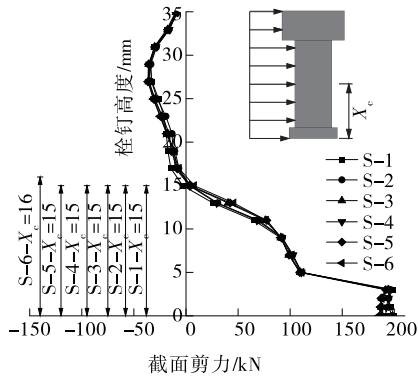


图 13 栓钉间距 $d=200\text{ mm}$ 时塑性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

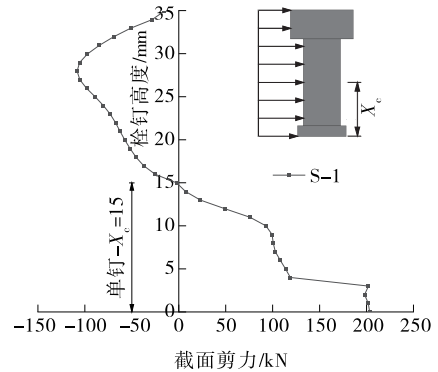


图 15 单钉时塑性阶段栓钉剪力及有效抗剪高度对比

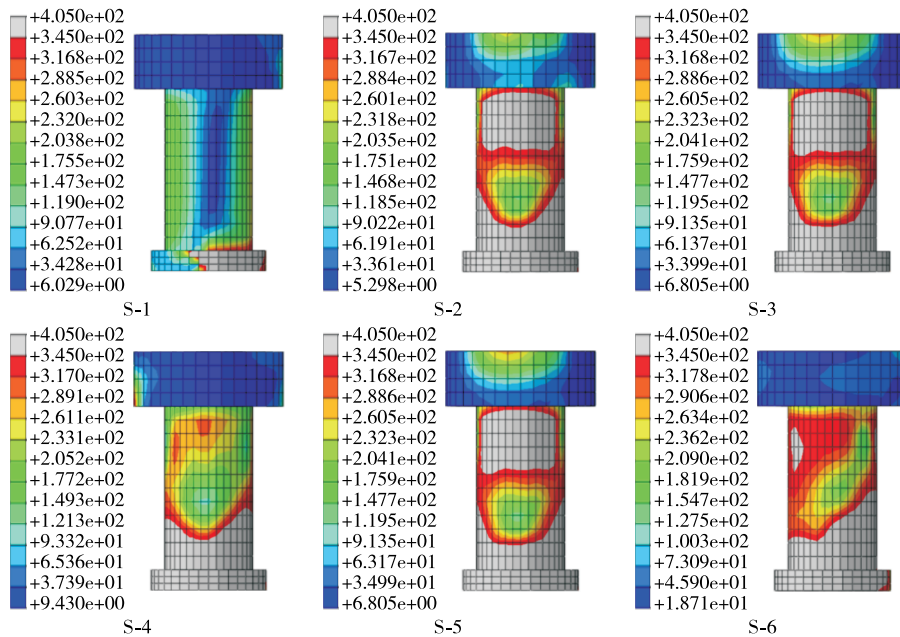


图 16 栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时塑性阶段不同位置栓钉的应力云图(单位: MPa)

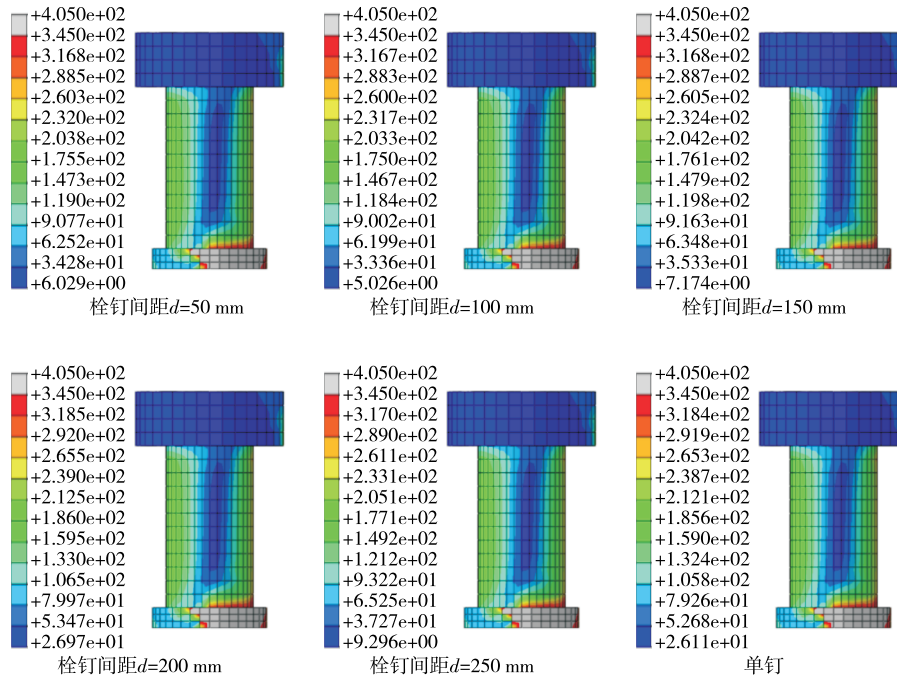


图 17 塑性阶段不同间距下栓钉 S-1 的应力云图(单位:MPa)

距 d 的减小,群钉效应在塑性阶段不太明显,但栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时,出现在加载端栓钉 S-1 几乎不参与受力、其余部位栓钉却达到屈服状态的现象(见图 16)。栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时,加载端栓钉 S-1 的有效抗剪高度 X_c 仅为 7 mm ,远小于单钉的抗剪有效高度 15 mm ,而其余部位栓钉的有效抗剪高度 X_c 远大于单钉的有效抗剪高度,分别为 25 mm 、 25 mm 、 23 mm 、 25 mm 、 23 mm 。随着栓钉间距 d 的增大,加载端栓钉 S-1 迅速参与受力(见图 17),其有效抗剪高度 X_c 由 $d=50\text{ mm}$ 时的 7 mm 增长到 $d=100\text{ mm}$ 、 150 mm 时的 13 mm 和 $d=200\text{ mm}$ 、 250 mm 时的 15 mm ,与单钉的有效抗剪高度基本一致;其余部位栓钉的有效抗剪高度 X_c 开始下降并逐渐呈现均匀受力状态。

图 18 为弹性阶段和塑性阶段栓钉极限剪力的变化。由图 18 可知:栓钉处于弹性阶段时,不同位置栓钉所承受的剪力差异较大,呈现从加载端栓钉 S-1 至 UHPC 板底部栓钉 S-6 逐渐增大的趋势;不同间距下栓钉所承受的剪力差异也较大,随着间距的增大,不同位置栓钉所承受的剪力呈现不均匀的情况。栓钉处于塑性阶段时,不同位置与间距下栓钉所承受的剪力基本一致,呈现较均匀的情况;但栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时,加载端栓钉所承受的剪力低于其余位置栓钉所承受的剪力。

3 群钉剪力变化趋势

图 19、图 20 分别为弹性阶段、塑性阶段不同间距下栓钉 S-1、栓钉 S-6、单钉的极限剪力对比。

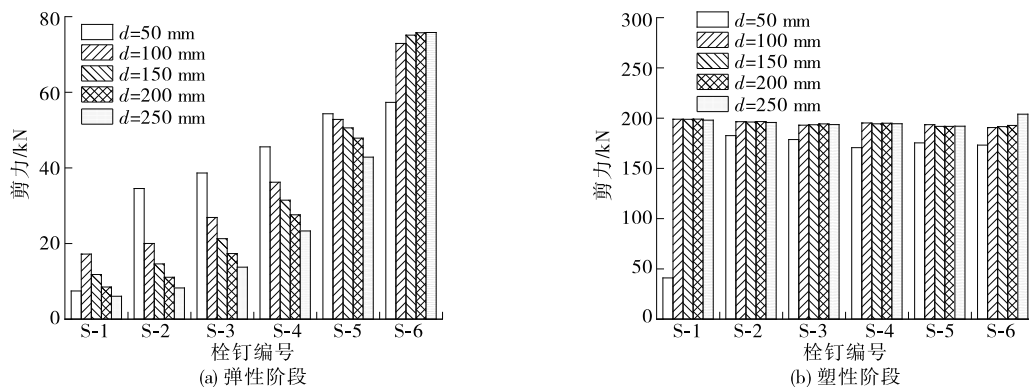


图 18 弹性阶段、塑性阶段栓钉极限剪力的变化

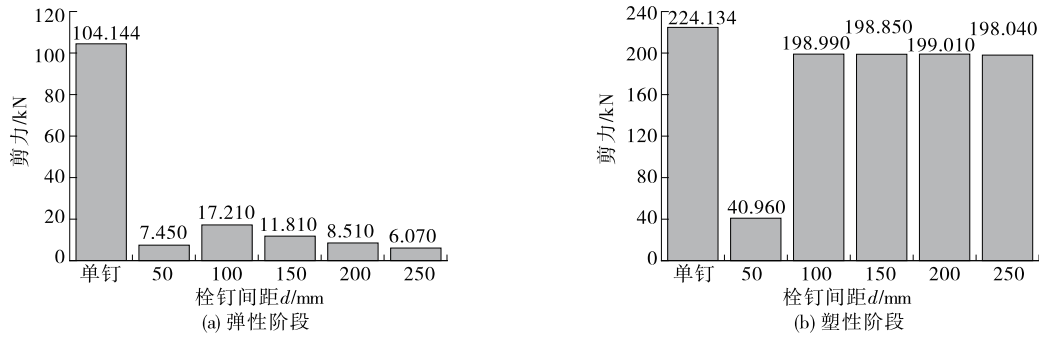


图 19 弹性阶段、塑性阶段不同间距下栓钉 S-1 的极限剪力对比

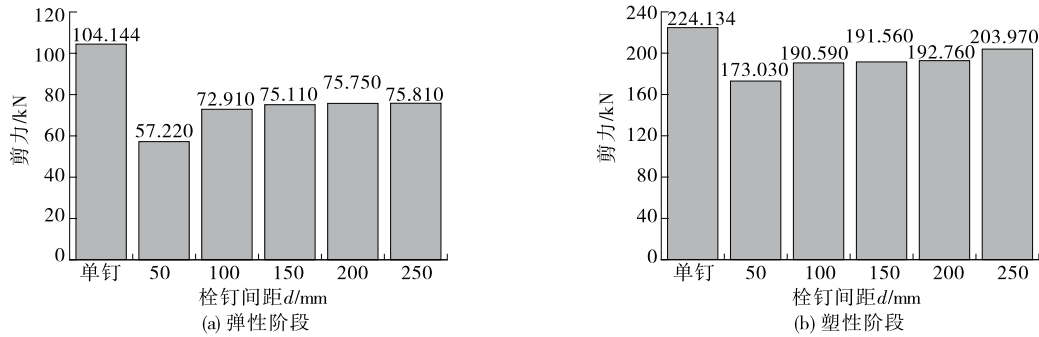


图 20 弹性阶段、塑性阶段不同间距下栓钉 S-6 的极限剪力对比

由图 19、图 20 可知：不论栓钉的间距为多少，不同位置栓钉皆受到群钉效应的影响，所承受的剪力低于单钉所承受的剪力。在弹性阶段，栓钉 S-1 在不同间距下所承受的剪力先增大后减小，拐点为 $d=100\text{ mm}$ ，但在间距 $d=100\text{ mm}$ 时所承受的最大剪力依旧远低于单钉所承受的剪力，仅为单钉的 5.83%~16.53%。在塑性阶段，栓钉 S-1 在间距 d 大于 100 mm 时承受的剪力较稳定，略低于单钉所承受的剪力，均值为 198.72 kN，约为单钉的 88.66%；间距 d 小于 100 mm 时突然下降至原有剪力的 20.00% 左右。不论弹性阶段还是塑性阶段，间距 d 小于 100 mm 时，与单钉相比，栓钉 S-6 所承受的剪力都减小，分别降低 45.06%、22.80% 左右；间

距 d 大于 100 mm 时栓钉 S-6 所承受的剪力基本稳定，弹性阶段、塑性阶段剪力均值分别为 74.90 kN、194.72 kN，约为单钉的 71.92%、86.88%。

4 群钉传力不均匀系数

栓钉传力过程中受栓钉间距、栓钉层数、钢板厚度、混凝土强度、交界面摩擦力、栓钉拔出效应等因素影响，各排栓钉承担的剪力出现不均匀现象，这种现象称为群钉效应。为表现栓钉根部剪力不均匀程度，定义栓钉根部剪力不均匀系数 $\lambda = F_i / \bar{F}$ ，其中 F_i 为第 i 层 ($i=1\sim 6$) 栓钉传递的荷载， \bar{F} 为各栓钉所传递荷载的均值。图 21 为弹性阶段、塑性阶段不同间距下栓钉的传力不均匀系数。

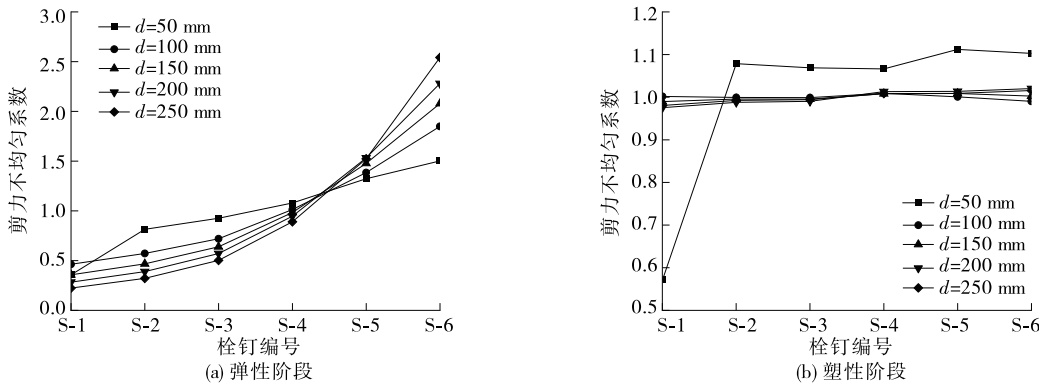


图 21 弹性阶段、塑性阶段不同间距下栓钉的传力不均匀系数

由图 21 可知:栓钉处于弹性阶段、栓钉距离 $d=50\text{ mm}$ 时,传力不均匀系数整体呈线性变化;其他间距下,从加载端栓钉 S-1 至 UHPC 板底部栓钉 S-6 传力不均匀系数呈现逐渐上升的抛物线形式,且栓钉间距越大,上升趋势越明显。栓钉处于塑性阶段、栓钉距离 $d=50\text{ mm}$ 时,加载端栓钉 S-1 的传力系数陡降至 0.57,其余栓钉对其剪力进行了分摊,其中栓钉 S-5、S-6 分摊最多,传力不均匀系数分别为 1.11、1.10;其他间距下,传力不均匀系数表现为直线形式,其值为 1.00 左右。

5 群钉性能退化研究

图 22 为单钉和不同间距下群钉的荷载-滑移曲线对比。由图 22 可知:由于群钉效应的存在,群钉的抗剪承载力和抗剪刚度平均值均小于单钉的抗剪承载力和抗剪刚度,且随着栓钉间距的减小,群钉的抗剪承载力和抗剪刚度平均值下降幅度增大,即使栓钉间距足够大,群钉的抗剪承载力也无法达到单钉的状态。

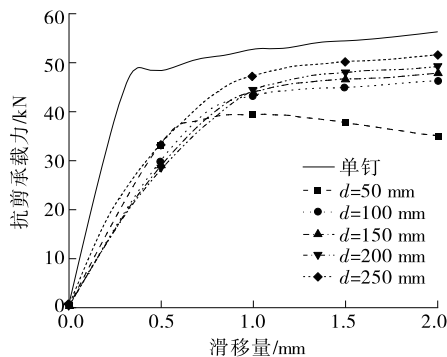


图 22 单钉和不同间距下群钉的荷载-滑移曲线对比

图 23 为不同栓钉间距下 UHPC 板混凝土损伤云图。由图 23 可知:栓钉间距 $d=50\text{ mm}$ 时,栓钉间的 UHPC 板出现贯穿性损伤,其平均抗剪承载力出现较大下降。

图 24 为单钉和群钉的抗剪承载力均值对比,图 25 为群钉抗剪承载力下降曲线及拟合曲线。由图 24、图 25 可知:不同间距下群钉抗剪承载力均值下降 16.04%~35.81%,栓钉间距与直径之比 d/r 为 7.69~19.23 时,群钉的抗剪承载力均值呈线性下降,下降率为 16.03%~24.64%; $d/r < 7.69$ 时,群钉的抗剪承载力均值下降 24.64%~35.81%;不考虑 $d/r < 7.69$ 时,抗剪承载力下降率拟合结果中拟合公式 $y = -0.055\ 98x + 30.482\ 60$ 优于 $y = -0.088\ 47x + 36.984\ 88$ 。

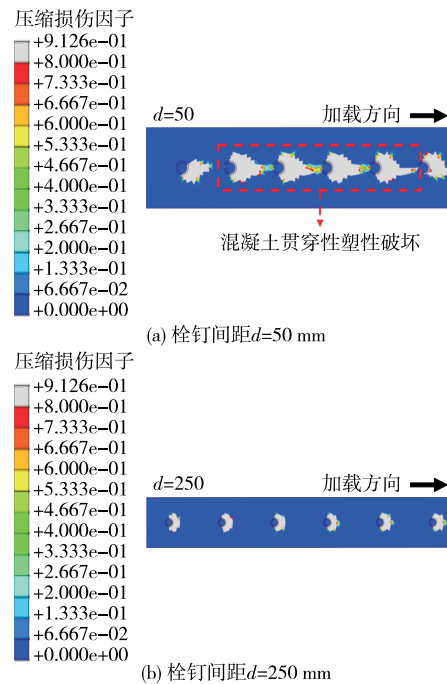


图 23 不同栓钉间距下 UHPC 板混凝土损伤云图

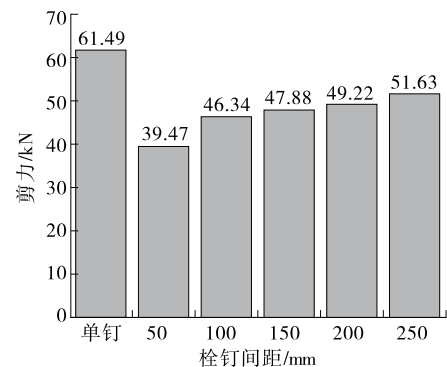


图 24 单钉与群钉的平均抗剪承载力对比

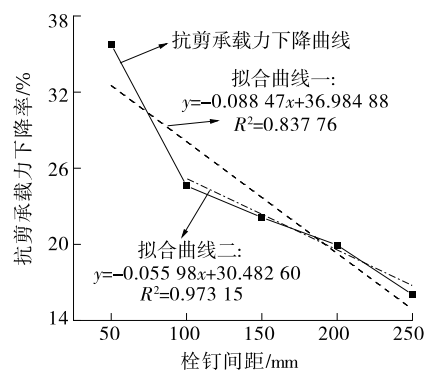


图 25 不同间距下栓钉抗剪承载力下降曲线及拟合曲线

6 结论

(1) 在弹性阶段、栓钉间距与直径之比 $d/r \geq$

7.69 时,栓钉的截面剪力和有效抗剪高度由加载端栓钉 S-1 向 UHPC 板底部栓钉 S-6 逐渐增大,但仍低于单钉的截面剪力和有效抗剪高度;在塑性阶段、 $d/r \geq 7.69$ 时,栓钉的截面剪力、有效抗剪高度与单钉差异不大。 $d/r < 7.69$ 时,加载端栓钉 S-1 几乎不参与受力,弹性阶段、塑性阶段其有效抗剪高度分别为 5 mm、7 mm;其余位置栓钉的截面剪力和有效抗剪高度有所提升,其中栓钉 S-6 增长最大,弹性阶段、塑性阶段的有效抗剪高度均为 23 mm。

(2) 栓钉间距在 250 mm 以内时,不同位置栓钉皆受到群钉效应的影响,剪力极值低于单钉所承受的剪力。 $d/r < 7.69$ 时,弹性阶段栓钉 S-1 的剪力极值为单钉的 5.83%~16.53%,塑性阶段的剪力极值约为单钉的 20.00%。 $d/r \geq 7.69$ 时,塑性阶段栓钉 S-1 的剪力极值均值为 198.72 kN,为单钉的 88.66%;弹性阶段、塑性阶段栓钉 S-6 的剪力极值均值分别为单钉的 71.92%、86.88%, $d/r < 7.69$ 时剪力极值下降 45.06%、22.80%左右。

(3) $d/r \geq 7.69$ 时,弹性阶段的传力不均匀系数呈逐渐上升的抛物线形式, d/r 越大,上升趋势越明显;塑性阶段的传力不均匀系数表现为直线形式,其值在 1.00 左右。 $d/r < 7.69$ 时,弹性阶段的传力不均匀系数呈线性变化;塑性阶段栓钉 S-1 的传力不均匀系数下降至 0.57,栓钉 S-5、S-6 的传力不均匀系数增大为 1.11、1.10。

(4) 不同间距下群钉的抗剪承载力均值下降 16.03%~35.81%。 $7.69 \leq d/r \leq 19.23$ 时,群钉的抗剪承载力均值呈线性下降,下降 16.03%~24.64%; $d/r < 7.69$ 时,群钉的抗剪承载力均值下降 24.64%~35.81%;忽略 $d/r < 7.69$ 时栓钉抗剪承载力的下降,下降率曲线拟合结果中,拟合公式 $y = -0.055 98x + 30.482 60$ 优于 $y = -0.088 47x + 36.984 88$ 。

参考文献:

[1] 《中国公路学报》编辑部.中国桥梁工程学术研究综述·2021[J].中国公路学报,2021,34(2):1-97.
[2] 陈宝春,韦建刚,苏家战,等.超高性能混凝土应用进展[J].建筑科学与工程学报,2019,36(2):10-20.
[3] 刘加平,刘建忠,韩方玉,等.基于钢-混凝土组合结构

轻量化的粗骨料超高性能混凝土研究进展与应用[J].建筑结构学报,2022,43(9):36-44.

- [4] ZHANG Y, CAI S K, ZHU Y P, et al. Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment[J]. Engineering Structures, 2020, 206: 110134.
[5] XU Q Z, SEBASTIAN W, LU K W, et al. Shear behaviour and calculation model for stud-UHPC connections: finite element and theoretical analyses[J]. Engineering Structures, 2022, 254: 113838.
[6] 王达,郑志凌,徐舟,等.钢-混组合结构中栓钉连接件长度对抗剪承载力影响研究[J].公路与汽运,2022(4):97-100+105.
[7] 肖亚鑫,鲁乃唯,陈方怀.钢-超高性能混凝土组合板连接件的抗剪性能[J].交通科学与工程,2020,36(1):44-49.
[8] TONG L W, CHEN L H, WEN M, et al. Static behavior of stud shear connectors in high-strength-steel-UHPC composite beams [J]. Engineering Structures, 2020, 218: 110827.
[9] 李聪,陈宝春,胡文旭,等.钢-UHPC 组合板栓钉抗剪承载力、滑移与刚度计算[J].工程力学,2023,40(6):110-121.
[10] 李萌,邵旭东,曹君辉,等.UHPC 中短栓钉抗剪性能试验及理论分析[J].中国公路学报,2021,34(8):191-204.
[11] 童忠国.钢-UHPC 轻型桥面板中栓钉研究[D].兰州:兰州交通大学,2021.
[12] 胡文旭,陈宝春,李聪,等.钢-UHPC 组合板群钉效应有限元分析[J].福州大学学报(自然科学版),2022,50(6):833-840.
[13] 周绪红,逯文茹,狄谨,等.钢锚箱栓钉剪力连接件群钉效应及抗剪承载力计算方法[J].中国公路学报,2014,27(12):33-45.
[14] 陈英,唐晖.钢混组合结构大直径栓钉的群钉效应研究[J].交通科学与工程,2024,40(3):100-107.
[15] 杨剑,方志.超高性能混凝土单轴受压应力-应变关系研究[J].混凝土,2008(7):11-15.
[16] 杨简.基于钢纤维增强作用的 UHPC 基本材性预测研究[D].福州:福州大学,2021.
[17] 中国机械科学研究院.电弧螺柱焊用圆柱头焊钉:GB/T 10433—2002[S].北京:中国标准出版社,2002.

收稿日期:2023-03-05