

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.202302152024061970

文章编号: 1674-599X(2024)03-0100-08

引用格式: 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.

Citation: CHEN Ying, TANG Hui. Study on the group stud effect of large diameter stud of steel-concrete composite structure[J]. J Transp Sci Eng, 2024, 40(3): 100-107.

# 钢混组合结构大直径栓钉的群钉效应研究

陈英<sup>1</sup>, 唐晖<sup>2</sup>

(1. 湖南城建职业技术学院, 湖南 湘潭 411101; 中铁交通投资集团公司有限公司, 广西 桂林 541000)

**摘 要:** 为了深入研究群钉效应对大直径栓钉抗剪性能的影响, 通过对以往试验数据进行有限元分析, 探讨了群钉效应影响下大直径栓钉抗剪强度与抗剪刚度降低的现象, 并根据计算结果提出了大直径栓钉极限抗剪强度与抗剪刚度的拟合公式。计算结果表明: 大直径栓钉的间距越小群钉效应越明显, 与单钉相比群钉抗剪强度与抗剪刚度均有明显的下降; 在群钉情形下, 弹性阶段的剪力不均匀系数呈马蹄形分布, 塑性阶段的剪力不均匀系数呈斜线状分布, 但栓钉间距过小时剪力不均匀系数呈月牙形分布; 栓钉处于弹性阶段时, 内侧栓钉的根部剪力比单钉根部剪力小, 外侧栓钉的根部剪力一般比单钉根部剪力小, 但栓钉间距较大时, 外侧栓钉的根部剪力会超过单钉根部剪力; 栓钉处于塑性阶段时, 内侧栓钉有效抗剪高度比单钉的高, 外侧栓钉有效抗剪高度比单钉的低; 大直径栓钉的间距与直径之比小于3.33时群钉效应明显, 高于8.33时群钉效应几乎消失。

**关键词:** 大直径栓钉; 群钉效应; 不均匀系数; 抗剪强度; 抗剪刚度; 钢混组合结构

中图分类号: U441

文献标志码: A

## Study on the group stud effect of large diameter stud of steel-concrete composite structure

CHEN Ying<sup>1</sup>, TANG Hui<sup>2</sup>

(1. Hunan Urban Construction College, Xiangtan 411101, China;

2. China Railway Communications Investment Group Co., Ltd., Guilin 541000, China)

**Abstract:** In order to further study the effect of group nailing effect on the shear properties of large diameter bolts, finite element analysis was carried out based on previous tests, and the phenomenon of the reduction of shear strength and shear stiffness of large diameter bolts under the influence of group nailing effect was further discussed. Based on the calculation results, the fitting formula of ultimate shear strength and shear stiffness of large diameter bolts was proposed. The results show that the smaller the distance between large diameter bolts is, the more obvious the effect of group nails is. The shear strength and shear stiffness of large diameter bolts both decrease significantly compared with that of single bolts. Under the influence of the group stud effect, the non-uniformity coefficient distribution of shear in the elastic stage is horseshoe shape, and that in the plastic stage is diagonal, but it is crescent shape when the distance between studs is too small. When the studs are in the elastic stage, the shear force of the inner stud is smaller than that of the single stud, and in general the shear force of the outer stud is smaller than that of the single stud, but when the distance between studs is too large the shear force of the outer stud is larger than that of the single stud. When the studs are in the plastic

收稿日期: 2023-02-15

通信作者: 唐晖(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事桥梁工程方面的研究工作。E-mail: tanghuiqlsd@163.com

投稿网址: <https://jtkxygc.csust.edu.cn/jtkxygc/home>

stage, the effective shear section height of the inner stud is higher than that of the single stud, and the effective shear section height of the outer stud is lower than that of the single stud. When the spacing to diameter ratio of large diameter studs is less than 3.33, the group effect is obvious, and when the ratio is higher than 8.33, the group effect has little effect.

**Key words:** large diameter stud; group nail effect; coefficient of non-uniformity; shear strength; stiffness of shear; steel and concrete composite structure

随着国内外桥梁技术的快速发展,大跨度桥梁的应用越来越广泛。其中由混凝土与钢梁组成的钢混组合桥面系是大跨度桥梁中最为常见的桥面系<sup>[1]</sup>,而栓钉是钢混组合桥面系剪力传递的关键,也是最容易发生破坏的构件<sup>[2]</sup>。在高剪切区域,大多应用直径22 mm及以下的栓钉,且以往大部分试验研究也局限于直径22 mm及以下的栓钉<sup>[3-5]</sup>。随着车流量日益增长及桥梁跨径的增大,原有的小直径栓钉逐渐不能满足钢混组合桥面系结构抗剪性能的需求,因此大直径栓钉开始应用到钢混组合桥面系结构中<sup>[6]</sup>。大直径栓钉在满足钢混组合桥面系抗剪性能的前提下不仅能有效减少栓钉的需求量,减少焊接工作量,还能产生一定的经济效益<sup>[7]</sup>。

由于栓钉具有优秀的抗剪性能与经济效益,国内外对栓钉抗剪性能的影响因素开展了许多研究<sup>[8-13]</sup>,通过研究发现,栓钉抗剪性能的影响因素众多,如材料特性、栓钉排列方式、栓钉的直径与高度、群钉效应等。王达等<sup>[14]</sup>结合试验与有限元计算结果发现,栓钉达到一定高度后其抗剪承载力变化不大,且栓钉在失效时其根部处的剪力与变形最大,并提出了一个长短钉的布置形式,使之在满足结构抗剪承载力的同时具有更好的经济效益。肖亚鑫等<sup>[15]</sup>结合试验与有限元计算结果发现,混凝土强度、栓钉直径和长度等参数对栓钉连接件的抗剪承载力均有影响,栓钉的抗剪性能随相应参数的增大而提高,其中栓钉的直径对其抗剪性能影响最大,两者呈近似线性关系。LEE等<sup>[16]</sup>通过3组推出试验与一组梁式试验发现,大直径栓钉具有较好的延性与抗剪性能,但疲劳性能比普通栓钉的略低,现有的规范需要提高大直径栓钉的安全系数。BADIE等<sup>[17]</sup>对直径为31 mm的栓钉进行了数组推出试验,发现相较于普通栓钉而言,大直径栓钉的抗剪性能更好,并根据试验结果推导了大直径栓钉的荷载滑移计算公式。赵根田等<sup>[18]</sup>通过9个群钉推出试验研究了循环荷载下的栓钉抗剪性能,发现大直径栓钉的能量耗散系数与抗剪性反而比普通栓

钉的小,在多层排列时栓钉之间出现传力不均匀的情况。周绪红等<sup>[19]</sup>采用有限元分析方法对钢锚箱中栓钉的群钉效应进行了研究,发现群钉效应将会导致栓钉的抗剪性能显著降低,进而导致栓钉的轴向应力发生变化。蔺钊飞等<sup>[20]</sup>通过三组直径为22、25、30 mm的大直径栓钉推出试验发现,直径25、30 mm的栓钉较直径22 mm的栓钉其抗剪承载力平均增大14%、42%,抗剪刚度平均增大35%、106%,同时还发现《公路钢结构桥梁设计规范》(JTG D64—2015)、EUROCODE 4规范、AASHTO LRFD规范对大直径栓钉的抗剪承载力计算均较为保守,且随着栓钉直径增大其安全余量逐渐减小。

上述研究结果表明,大直径栓钉在钢混组合桥面系结构中应用前景较为广泛,但目前关于大直径栓钉抗剪性能的研究仍存在不足,并且在栓钉抗剪性能的众多影响因素中,如材料特性、栓钉排列方式、栓钉的直径与高度、群钉效应等,群钉效应对其抗剪性能影响较大,因此有必要对群钉效应下的大直径栓钉抗剪性能进行更深入的研究。

## 1 有限元模型

为了探明大直径栓钉的群钉效应及其对栓钉抗剪性能的影响,本文对参考文献[14]中的9个推出试验建立了ABAQUS精细化有限元模型并进行分析。文献中推出试验的混凝土构件尺寸为600 mm×650 mm×200 mm,栓钉直径为25、27、30 mm,栓钉高度为155 mm,工字钢尺寸为255 mm×255 mm,翼缘板厚度为14 mm。

### 1.1 有限元模型建立

栓钉有限元分析考虑材料非线性,混凝土材料选用C50,栓钉材料选用ML15,工字钢材料选用Q345。其中C50混凝土本构关系采用《混凝土结构设计规范》(GB 50010—2010)中的混凝土本构关系曲线;栓钉与工字钢本构关系采用三折线本构模型,具体材料参数如表1所示。

表1 构件材料属性

Table 1 Material properties of components

材料	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	极限强度/ MPa	泊松比
ML15 栓钉	210	410	492	0.3
Q345 钢板	210	345	470	0.3

为了在满足计算精度要求的同时实现时间成本控制,本文通过对推出结构的对称面添加对称约束将模型简化为1/4模型进行计算分析,如图1所示。

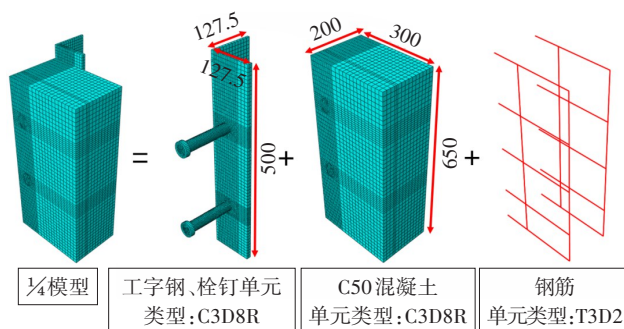


图1 有限元模型(单位:mm)

Fig. 1 Finite element model (unit:mm)

在工字钢加载端添加参考点RP1与实际加载面进行绑定,同时施加10 mm位移的边界条件,并对混凝土底部施加固定约束来实现加载条件。栓钉与混凝土之间的相互作用采用切向摩擦的罚函数方程与法向硬接触方式模拟,其中摩擦系数采用0.3,忽略工字钢板与混凝土之间的摩擦。

## 1.2 计算结果验证与分析

将文献[14]的9个推出试验所得到的栓钉极限承载力及最大滑移量与上述有限元计算结果进行对比,结果如表2所示。有限元计算结果与文献试验结果基本吻合,证明了有限元模型计算结果具有很高的精度。在文献[14]的推出试验中,栓钉直径为25、27 mm的试验值与本文计算值之间的误差相对较大,栓钉直径为30 mm的试验值与本文计算值之间的误差相对较小,其误差分别为3%、3%、1%, $\bar{P}_{\text{test}}/P_{\text{FEA}}$ 的平均值为0.98,变异系数为0.04。将本文有限元计算的荷载峰值所对应的滑移量与文献[14]的试验滑移量峰值进行比较,栓钉直径为25、27、30 mm所对应的误差分别为3%、1%、2%, $\bar{S}_{\text{test}}/S_{\text{FEA}}$ 平均值为1.02,变异系数为0.07。

表2 试验结果与有限元计算值对比

Table 2 Comparison between test results and finite element calculation values

试件编号	推出试验				有限元分析		$\bar{P}_{\text{test}}/P_{\text{FEA}}$	$\bar{S}_{\text{test}}/S_{\text{FEA}}$
	承载力 $P_{\text{test}}/\text{kN}$	平均承载力 $\bar{P}_{\text{test}}/\text{kN}$	滑移量 $S_{\text{test}}/\text{mm}$	平均滑移量 $\bar{S}_{\text{test}}/\text{mm}$	承载力 $P_{\text{FEA}}/\text{kN}$	滑移量 $S_{\text{FEA}}/\text{mm}$		
ST25-B1	176.4	180.13	6.33	6.79	185.00	6.60	0.97	1.03
ST25-B2	176.7		6.72					
ST25-B3	187.3		7.31					
ST27-B1	208.2	211.20	9.19	8.82	217.00	8.76	0.97	1.01
ST27-B2	238.5		8.36					
ST27-B3	186.9		8.92					
ST30-B1	222.8	232.27	9.39	9.36	235.55	9.21	0.99	1.02
ST30-B2	240.0		9.24					
ST30-B3	234.0		9.46					
平均比值							0.98	1.02
变异系数							0.04	0.07

## 2 群钉剪力分布

以上述有限元模型为基础,将栓钉数量增至6个,编号为S1~S6,栓钉之间的间距 $h_s$ 分别设为50、100、150、200、250 mm。栓钉在抵抗剪力的过程中受力复杂,如栓钉根部的弯矩会导致钢板发生局部变形;端部栓钉在抗剪过程中提前进入塑性阶段;

各栓钉刚度不一致;各栓钉之间混凝土强度不一致等。这些情况发生在大直径群钉抗剪过程中,将会使力的传递过程发生变化,并且各栓钉之间还会相互影响,从而影响各排栓钉所分担的剪力,产生群钉效应。以往试验研究发现群钉效应影响因素众多,如栓钉直径、栓钉间距、摩擦力作用、单个栓钉的刚度等。为能够直观地体现栓钉根部剪力的不均匀程度,定义栓钉根部剪力不均匀系数为:

$$\lambda = F_i / \bar{F} \quad (1)$$

式中:  $F_i$  为第  $i$  个 ( $i = 1 \sim 6$ ) 栓钉传递的荷载;  $\bar{F}$  为各栓钉传递荷载的均值。

图2为不同间距下栓钉分别处于弹性阶段与塑性阶段时的剪力不均匀系数,图例中6代表栓钉数量,50~250代表栓钉间距。由图2可知,当栓钉处于弹性阶段时,其剪力不均匀系数呈马蹄状分布,剪力由端部栓钉S1传递至中部栓钉S3时不断减小,再由中部栓钉S4传递至端部栓钉S6时不断增大,剪力不均匀系数的差值范围为0.05~0.16;当栓钉由弹性阶段进入塑性阶段后,间距  $h_s$  为100~250 mm的栓钉剪力不均匀系数逐渐由马蹄状分布变为斜线分布,剪力从内侧栓钉S1传递至外侧栓钉S6的过程中不断增大,剪力不均匀系数的差值范围为0.50~0.57;间距  $h_s$  为50 mm的栓钉的剪力不均匀系数呈月牙形分布,说明其端部的栓钉S1、S6依旧承受较大的剪力,内侧栓钉S1所承受的剪力发生了突变。

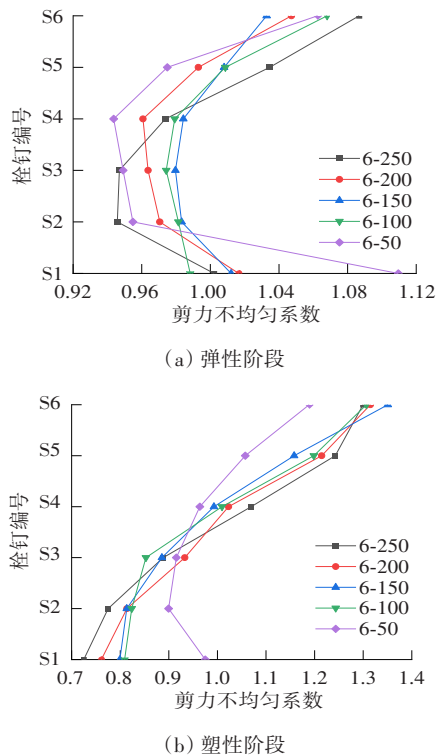


图2 剪力不均匀系数

Fig. 2 Uneven coefficient of force transmission

图3~4分别为弹性阶段与塑性阶段不同间距的端部栓钉剪力对比。由图3可知,当栓钉处于弹性阶段时,间距  $h_s$  为50 mm、编号为S1的栓钉的根部所受剪力最大,但小于单钉根部所承受的剪力,差值为20 kN;随着剪力的传递,间距  $h_s$  为50 mm、编号

为S6的栓钉的根部所受剪力最小,与单钉根部所受的剪力差值为46 kN;而间距  $h_s$  为250 mm、编号为S6的栓钉的根部所受剪力最大,比单钉根部所受的剪力大28 kN。由图4可知当栓钉由弹性阶段转入塑性阶段后,不同间距的栓钉根部所受剪力与单钉根部剪力差异不大,但剪力沿栓钉高度的分布出现了差异。当取剪力为正的区域为栓钉有效抗剪高度时,编号S1的栓钉有效抗剪高度均值为70 mm,高于单钉的有效抗剪高度48 mm;随着剪力的传递,编号S6的栓钉有效抗剪高度均值降低至38 mm,低于单钉的有效抗剪高度48 mm。

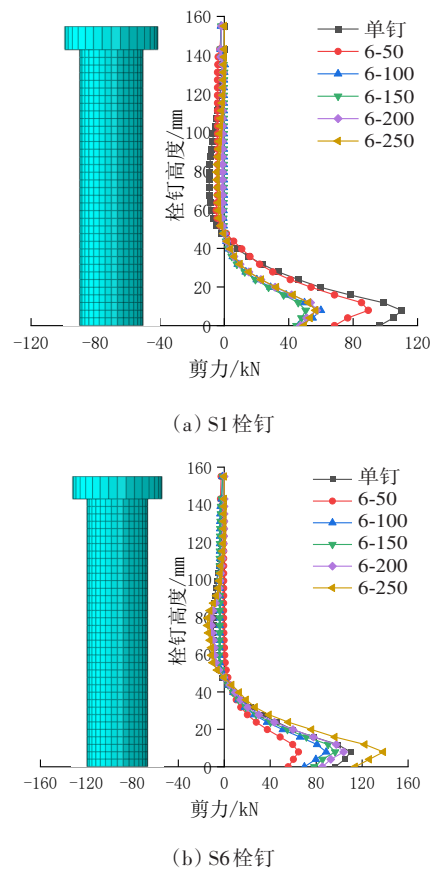


图3 弹性阶段不同间距下端部栓钉剪力对比

Fig. 3 Comparison of stud shear forces at the lower end at different distances in the elastic stage

图5~6分别为弹性阶段与塑性阶段  $h_s$  为50、250 mm的栓钉剪力对比。当栓钉间距  $h_s$  为50 mm时,弹性阶段编号S1的内侧栓钉根部剪力最大,但小于单钉根部剪力,差值为46 kN,其有效抗剪高度与单钉的有效抗剪高度基本一致;进入塑性阶段后,栓钉的有效抗剪高度逐渐增大,编号S1~S5的栓钉有效抗剪高度都略高于单钉的有效抗剪高度,而编号S6的外侧栓钉有效抗剪



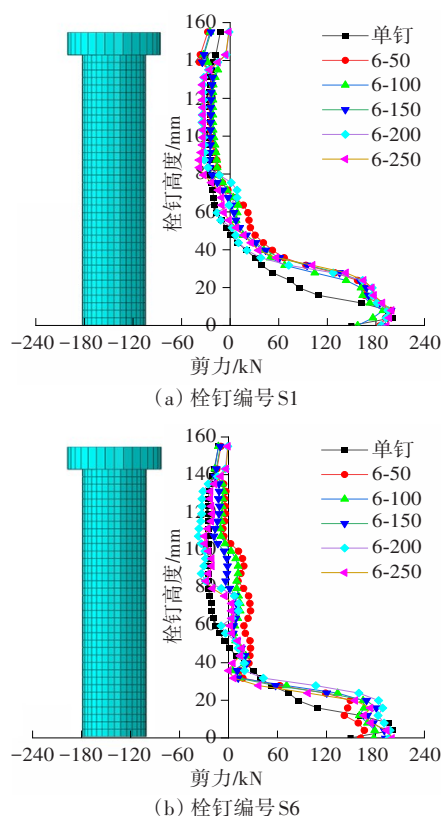


图4 塑性阶段不同间距下端部栓钉剪力对比

Fig. 4 Comparison of stud shear forces at the lower end at different distances in the plastic stage

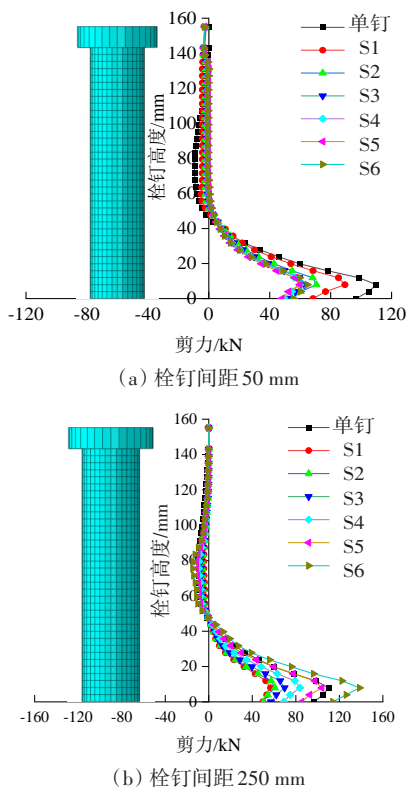


图5 弹性阶段不同位置的栓钉剪力对比

Fig. 5 Comparison of stud shear forces at different positions in the elastic stage

高度发生突变,低于单钉的有效抗剪高度。当栓钉间距  $h_s$  为 250 mm 时,弹性阶段编号 S6 的外侧栓钉根部剪力最大,大于单钉根部剪力,差值为 28 kN;其余栓钉根部剪力小于单钉根部剪力。进入塑性阶段后,编号 S1 ~ S5 的栓钉有效抗剪高度与单钉的有效抗剪高度基本一致,编号 S6 的外侧栓钉有效抗剪高度发生突变,低于单钉的有效抗剪高度。

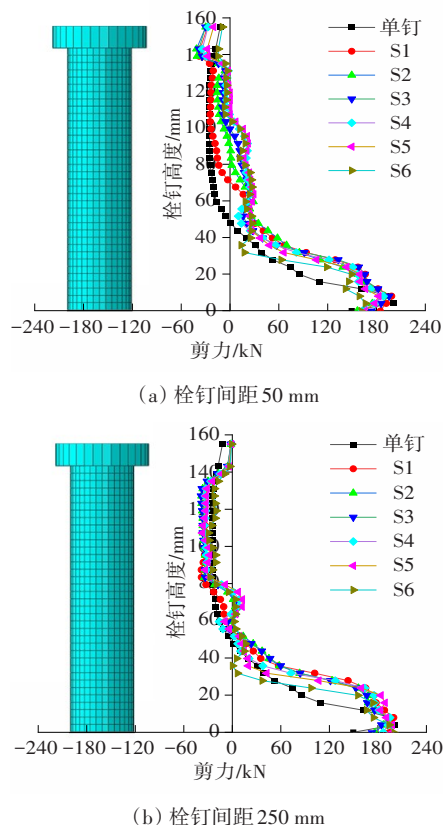


图6 塑性阶段不同位置的栓钉剪力对比

Fig. 6 Comparison of stud shear forces at different positions in the plastic stage

### 3 群钉抗剪性能研究

根据上述有限元模型计算的不同间距  $h_s$  下群钉 ( $i=6$  个) 的结果与单钉的计算结果,得到荷载-滑移曲线、平均极限抗剪承载力和平均抗剪刚度,如图7和图8(图例中栓钉编号同前)所示。由图8可知,受群钉效应影响,各间距下平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度都低于单钉的计算值,且栓钉间距越小,平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度的下降幅度越大;当栓钉间距与直径之比 ( $h_s/d$ ) 为 3.33 ~ 8.33 时,平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度变化不显著,当  $h_s/d$  为 1.66 ~ 3.33 时其变化较明显。

图9所示为群钉抗剪性能的下陷率。由图9可知,当 $h_s/d$ 为1.66( $h_s$ 为50 mm)时栓钉的平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度下陷率最大,分别为23.63%、58.50%;当 $h_s/d$ 为8.33( $h_s$ 为250 mm)时栓钉的平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度下陷率最小,分别为8.93%、10.41%。平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度随栓钉间距的变化基本呈线性关系。有限元计算结果与公式拟合结果具有很好的一致性,对大直径栓钉群钉效应的工程应用具有一定的参考价值。

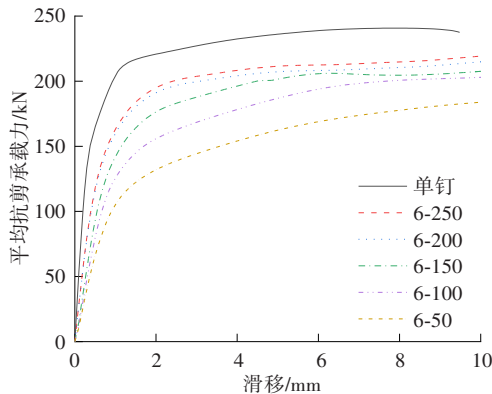
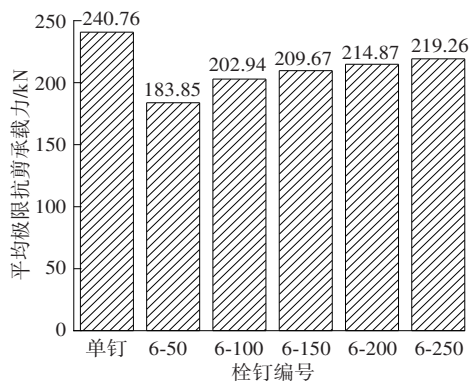
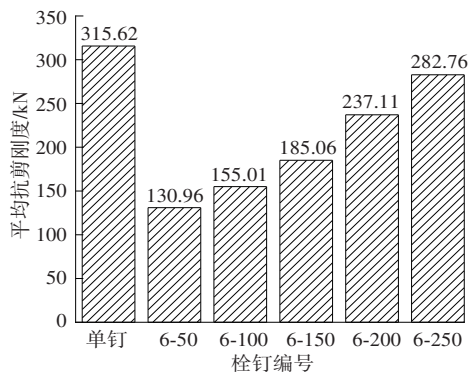


图7 荷载-滑移曲线

Fig. 7 Load-slip curve



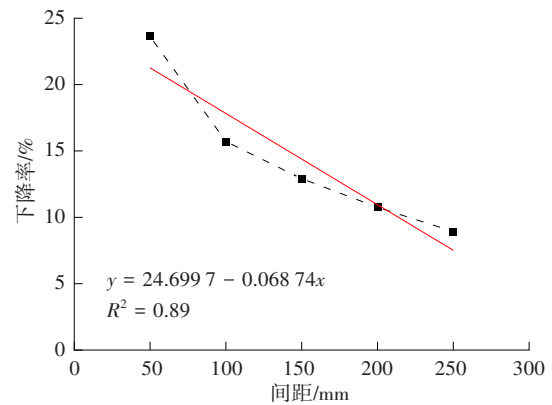
(a) 平均极限抗剪承载力



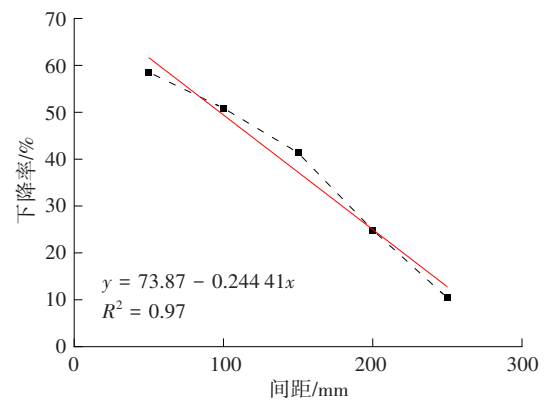
(b) 平均抗剪刚度

图8 群钉抗剪性能

Fig. 8 Shear resistance of group nails



(a) 平均极限抗剪承载力



(b) 平均抗剪刚度

图9 群钉抗剪性能下陷率

Fig. 9 Average performance degradation rate

## 4 结论

1) 大直径栓钉的群钉效应随着栓钉间距的减小而愈发明显,当栓钉间距为50 mm时,平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度均出现了较大幅度的下降;当栓钉间距为250 mm时,平均极限抗剪承载力与平均抗剪刚度下降并不明显,但群钉效应依旧存在一定影响。

2) 当栓钉处于弹性阶段时,剪力不均匀系数呈马蹄形分布,端部栓钉所承受的剪力最大,中部栓钉所承受的剪力最小;当栓钉进入塑性阶段后,剪力不均匀系数呈线形分布,外侧栓钉承受的剪力大,内侧栓钉承受的剪力小;但栓钉间距过小会导致内侧栓钉所承受的剪力发生突变,剪力不均匀系数整体呈现月牙形分布。

3) 栓钉处于弹性阶段时,不同间距的内侧栓钉的根部剪力比单钉根部剪力小,外侧栓钉的根部剪力一般比单钉根部剪力小,当栓钉间距较大时外侧栓钉根部剪力会超过单钉根部剪力;栓钉处于塑性

阶段时,内侧栓钉有效抗剪高度比单钉的高,外侧栓钉有效抗剪高度比单钉的低。

4) 当栓钉间距与直径比小于3.33时群钉效应较明显,抗剪性能有较大的下滑;当栓钉间距与直径比大于8.33时群钉效应几乎消失。

## 参考文献(References):

- [1] 刘明虎. 桥梁钢-混凝土结合技术工程实践与展望[J]. 桥梁建设, 2022, 52(1): 18-25.  
LIU Minghu. Practices and prospects of steel-concrete composite technology in bridge engineering [J]. Bridge Construction, 2022, 52(1): 18-25.
- [2] 汪洋, 张玉杰, 陈炳聪. 钢-混凝土组合梁栓钉剪力连接件抗剪承载力研究[J]. 建筑科学, 2019, 35(1): 20-24. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.01.004.  
WANG Yang, ZHANG Yujie, CHEN Bingcong. Shear capacity study on stud shear connector of steel-concrete composite beams [J]. Building Science, 2019, 35(1): 20-24. DOI: 10.13614/j.cnki.11-1962/tu.2019.01.004.
- [3] 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): 246-254. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.027.  
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): 246-254. DOI: 10.19721/j.cnki.1001-7372.2017.03.027.
- [4] 丁发兴, 倪鸣, 龚永智, 等. 栓钉剪力连接件滑移性能试验研究及受剪承载力计算[J]. 建筑结构学报, 2014, 35(9): 98-106.  
DING Faxing, NI Ming, GONG Yongzhi, et al. Experimental study on sliding performance of stud shear connectors and calculation of shear capacity [J]. Journal of Building Structures, 2014, 35(9): 98-106.
- [5] 薛伟辰, 丁敏, 王骅, 等. 单调荷载下栓钉连接件受剪性能试验研究[J]. 建筑结构学报, 2009, 30(1): 95-100.  
XUE Weichen, DING Min, WANG Hua, et al. Experimental studies on behavior of stud shear connectors under monotonic loads [J]. Journal of Building Structures, 2009, 30(1): 95-100. DOI: 10.14006/j.jzjgxb.2009.01.014.
- [6] XU Q Z, LU K W, WANG J Q, et al. Performance of large-diameter studs in thin ultra-high performance concrete slab [J]. Structures, 2021, 34: 4936-4951.
- [7] HIRAMA C, ISHIKAWA T, HISAGI A. Shear strength of headed stud push-out tests: comprehensive literature review focusing on slab type, failure mode, and large-diameter headed stud [C]//The Online Collection for Conference Papers of Civil Engineering. Berlin: Ernst & Sohn Verlag für Architektur und Technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, 2017: 2013-2022.
- [8] XU C, SU Q, SUGIURA K. Mechanism study on the low cycle fatigue behavior of group studs shear connectors in steel-concrete composite bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 138: 196-207.
- [9] WANG Y H, YU J, LIU J P, et al. Shear behavior of shear stud groups in precast concrete decks [J]. Engineering Structures, 2019, 187: 73-84.
- [10] 马天宇, 刘永健, 孙泽坤, 等. 集簇式栓钉抗剪承载力折减系数计算方法[J]. 建筑科学与工程学报, 2022, 39(5): 160-171.  
MA Tianyu, LIU Yongjian, SUN Zekun, et al. Calculation method of reduction coefficient of shear capacity of cluster studs [J]. Journal of Building Science and Engineering, 2022, 39(5): 160-171.
- [11] 范亮, 徐英铭, 谭阳. 集束群钉式装配组合梁界面滑移计算理论研究[J]. 吉林大学学报(工学版), 2023, 53(9): 2533-2541.  
FAN Liang, XU Yingming, TAN Yang. Theoretical study on interface slip calculation of composite beams assembled with cluster nailing [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2023, 53(9): 2533-2541.
- [12] 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): 80-86.  
YANG Yuehua, LIU Yongjian. Push-out tests and plastic analysis of group stud connectors [J]. Bridge Construction, 2013, 43(4): 80-86.
- [13] 侯文崎, 叶梅新. 铁路桥梁群钉组合结构极限承载力和静力行为分析[J]. 中国铁道科学, 2011, 32(1): 55-61.  
HOU Wenqi, YE Meixin. Analysis on ultimate bearing capacity and static behavior of railway bridge beam group nail composite structure [J]. China Railway Science, 2011, 32(1): 55-61.
- [14] 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.  
WANG Da, ZHENG Zhiling, XU Zhou, et al. Study on the influence of stud connector length on shear capacity of steel-composite structure [J]. Highway & Automobile Transportation, 2022(4): 97-100, 105.
- [15] 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.  
XIAO Yaxin, LU Naiwei, CHEN Fanghui. Shear behavior of steel-ultra-high performance concrete composite plate connectors [J]. Transportation Science and Engineering, 2020, 36(1): 44-49.
- [16] LEE P G, SHIM C S, CHANG S P. Static and fatigue

- behavior of large stud shear connectors for steel-concrete composite bridges [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2005, 61: 1270-1285.
- [17] BADIE S S, TADROS M K, KAKISH H F, et al. Large shear studs for composite action in steel bridge girders [J]. Journal of Bridge Engineering, 2002, 7(3): 195-203.
- [18] 赵根田,侯智译,高鹏,等. 拟静力作用下群钉连接件抗剪性能研究[J]. 工程力学, 2020, 37(7): 201-213.  
ZHAO Gentian, HOU Zhiyi, GAO Peng, et al. Study on shear behavior of group nail connectors under quasi-static action [J]. Engineering Mechanics, 2020, 37(7): 201-213.
- [19] 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.  
ZHOU Xuhong, LU Wenru, DI Jin, et al. Calculation method of group nail effect and shear capacity of steel anchor box stud shear connectors [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(12): 33-45.
- [20] 蔺钊飞,刘玉擎. 大直径焊钉连接件抗剪性能试验[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2015, 43(12): 1788-1793.  
LIN Zhaoifei, LIU Yuqing. Experimental study on shear behavior of large stud connectors [J]. Journal of Tongji University (Natural Science Edition), 2015, 43(12): 1788-1793.

(责任编辑:欧碧峰;英文编辑:杜雪明)

(上接第8页)

- mineralization mechanism and application research of sporosarcina pasteurii [J]. Progress in Biochemistry and Biophysics, 2020, 47(6): 467-482. DOI: 10.16476/j.pibb.2020.0012.
- [17] YANG Z, CHENG X H. A performance study of high-strength microbial mortar produced by low pressure grouting for the reinforcement of deteriorated masonry structures [J]. Construction and Building Materials, 2013, 41: 505-515. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2012.12.055.
- [18] ZHANG Y, GUO H X, CHENG X H. Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar [J]. Construction and Building Materials, 2015, 77: 160-167. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.040.
- [19] TOBLER D J, MACLACHLAN E, PHOENIX V R. Microbially mediated plugging of porous media and the impact of differing injection strategies [J]. Ecological Engineering, 2012, 42: 270-278. DOI: 10.1016/j.ecoleng.2012.02.027.
- [20] 刘伟,曾鹏,闫雷,等. 循环冲击下弱风化岩石力学特性与渗透率演化[J]. 煤炭学报, 2021, 46(6): 1855-1863. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0066.  
LIU Wei, ZENG Peng, YAN Lei, et al. Mechanical properties and permeability evolution of weakly weathered rocks under cyclic impact [J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(6): 1855-1863. DOI: 10.13225/j.cnki.jccs.2020.0066.
- [21] 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): 52-55. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2010.09.016.  
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): 52-55. DOI: 10.16791/j.cnki.sjg.2010.09.016.
- [22] 崔明娟,郑俊杰,章荣军,等. 化学处理方式对微生物固化砂土强度影响研究[J]. 岩土力学, 2015, 36(增刊1): 392-396. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.068.  
CUI Mingjuan, ZHENG Junjie, ZHANG Rongjun, et al. Study on the influence of chemical treatment methods on the strength of microbial solidified sand [J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36 (sup 1): 392-396. DOI: 10.16285/j.rsm.2015.S1.068.

(责任编辑:石月珍;英文编辑:陈成)