

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2020.194



开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 预制-装配式多键群剪力键力学行为试验研究

石璐, 范亮

(重庆交通大学 土木工程学院, 重庆, 400074)

**摘要:**为研究预制-装配式群钉连接件键群数量对剪力键受力特性的影响,开展了单键群及双键群装配式群钉剪力键推出加载试验,对比研究单键群和双键群试件的荷载-滑移曲线、破坏形态及抗剪承载力,并结合三键群及四键群试件数值模拟,研究多键群下的装配式剪力键承载力折减效应。研究表明:单键群和双键群剪力键的破坏模式均为栓钉剪断,单键群试件的裂缝数量少于双键群试件;键群间受力不均匀现象随荷载增大逐渐显著,沿高度方向的滑移呈现出下方大上方小的分布规律,界面最小滑移约为最大滑移的67%,呈现出明显的不均匀性;承载力折减效应随着键群数量的增多而增加,双、三、四键群试件相对于单键群试件的折减分别为0.84、0.80、0.72;基于能量法分析了多键群间由于受力不均匀产生的多键群承载力折减效应,提出了多键群装配式剪力键承载力折减系数计算式,该表达式计算结果与有限元计算结果吻合较好。

**关键词:**桥梁工程;剪力键;装配;承载力;力学行为

**中图分类号:**TU398.9;TU317.1 **文献标志码:**A **文章编号:**2096-6717(2022)04-0105-08

## Experimental study on mechanical behavior of prefabricated multi group shear key

SHI Lu, FAN Liang

(College of Civil Engineering, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, P. R. China)

**Abstract:** In order to find out the influence of the number of key groups of precast-assembled nail group connector on the mechanical properties of shear keys, the push-out loading tests of single key group and double key group are carried out. The load-slip curve, failure form and shear capacity of the group specimens, combined with the numerical simulation of the three-bond group and four-bond group specimens, are used to study the bearing capacity reduction effect of the assembled shear key under the multi-bond group. The results show that the failure modes of the single bond group and the double bond group shear bond are both stud shearing, however, the number of cracks of the single bond group specimen is less than that of the double bond group specimen. The force inhomogeneity between bond groups gradually becomes obvious with the increase of load. Meanwhile, it is the fact that the distribution of the slip along the height direction is larger than that of the upper part, and the minimum slip of the interface is

**收稿日期:**2020-08-05

**基金项目:**国家自然科学基金(51308571);重庆市自然科学基金(cstc2018jcyjAX0509)

**作者简介:**石璐(1996-),女,主要从事组合结构研究,E-mail:1024396906@qq.com.

范亮(通信作者),女,教授,博士,E-mail:fanliang@cqjtu.edu.cn.

**Received:**2020-08-05

**Foundation items:**National Natural Science Foundation of China (No. 51308571); Natural Science Foundation of Chongqing (No. cstc2018jcyjAX0509)

**Author brief:**SHI Lu (1996-), main research interest: composite structure, E-mail: 1024396906@qq.com.

FAN Liang (corresponding author), professor, PhD, E-mail: fanliang@cqjtu.edu.cn.

about 67% of the maximum, showing obvious inhomogeneity. The reduction effect of bearing capacity increases with the increase of the number of bond groups, and the reduction of double bond group, three bond group and four bond group relative to single bond group are 0.84, 0.80 and 0.72 respectively. Based on the energy method, the bearing capacity reduction effect of multi bond group due to uneven force is analyzed, and a simplified formula of bearing capacity reduction factor is proposed, which is in good agreement with the finite element calculation results.

**Keywords:** bridge engineering; shear key; assembling; bearing capacity; mechanical behavior

近年来,钢-混组合结构由于能够充分发挥钢和混凝土两种材料的特性<sup>[1]</sup>,力学性能好,施工方便,得到了迅速发展,被广泛应用于桥梁、高层建筑等领域。作为钢-混组合结构的重要组成部分,剪力键防止界面处钢梁与混凝土板的滑移和分离。

目前,对现浇组合结构中栓钉连接件的研究已相当充分,针对剪力键的承载力、刚度以及对组合梁力学行为的影响开展了较多的单钉以及群钉试验研究<sup>[2-4]</sup>。周绪红等<sup>[5]</sup>发现,群钉效应会导致平均单个栓钉承载力和抗剪刚度显著降低。苏庆田等<sup>[6-7]</sup>进行了 1 组单钉和 5 组不同群钉布置形式的连接件推出试验,得到了群钉布置形式的荷载-滑移曲线以及表达式。Zhang 等<sup>[8]</sup>考虑横向配筋率、剪切连接度、螺栓直径对组合梁剪切特性的影响,提出了纵向双排螺柱的纵向抗剪强度计算公式。

随着装配式组合结构的广泛应用,逐步开展了装配式组合结构的研究,分析了装配式组合结构中剪力键的力学行为影响<sup>[9-11]</sup>。Wang 等<sup>[12]</sup>考虑了后浇孔形状、加载方式以及浇筑方法的影响,设计了 4 个现浇推出试件和 12 个预制推出试件,得到现有的设计公式可以用来计算抗剪栓钉组的抗剪承载力。项贻强等<sup>[13]</sup>开展了 3 片装配组合梁与 1 片现浇组合梁的对比试验,认为在完全抗剪设计时,栓钉布置形式对组合梁的刚度和承载力影响较小。刘沫宇等<sup>[14-15]</sup>开展了 1 片 2×8.5 m 装配式连续组合梁的试验研究,结合数值分析,认为装配集束钉群满足港珠澳大桥中装配组合连续梁桥的设计要求。Shim 等<sup>[16]</sup>研究发现,JSCE、EC-4、Guidelines 及 AASHTO 等规范中均缺乏集束钉群装配式组合结构相关设计条款,表明预制-装配式组合结构亟待深入研究。学者们开展了大量对现浇单钉、钉群以及装配式组合梁的研究,但对于预制-装配式键群力学行为研究较少,特别是多个装配式集束键群间的共同工作性能的研究尚未见报道。考虑到多键群共同工作更接近于装配式组合梁中剪力键的真实受力状态,为了更好地研究装配式键群数量对结构受力的影响,开展了单键群和多键群装配式剪力键对比研究,讨论多键群力学行为及承载力折减效应。

## 1 单键群与双键群的装配式剪力键推出试验

### 1.1 试件设计与制作

设计了一组单键群(N1)和一组双键群(N2)栓钉推出试验,每组各 3 个试件。试件的设计参照了欧洲 Eurocode4-2004 规范<sup>[17]</sup>,根据试验的实际要求和条件对试件作部分调整。试件尺寸和试件制作顺序如图 1、图 2 所示,钢梁厚度为 9 mm,因先后浇筑混凝土界面处为薄弱界面,故在后浇孔洞两侧设计双层箍筋,并在双层箍筋 4 个角位置处放置 4 根竖向  $\phi 6.5$  的 HRB335 钢筋形成钢筋笼,且混凝土保护层厚度为 10 mm,H 型钢均为热轧 Q235,试件中栓钉采用直径 13 mm、长 80 mm 的 ML15,先浇混凝土为 C50,后浇混凝土为 C60,先后浇混凝土立方体抗压强度试验和弹模试验均按照《普通混凝土力学性能试验方法》(GB/T 50081—2002)<sup>[18]</sup>进行测试。材性如表 1 所示。

表 1 材性参数

Table 1 Material parameters

材料	28 d 强度 值/MPa	弹性模 量/MPa	屈服强 度/MPa	极限强 度/MPa
先浇混凝土	58.9	$4.9 \times 10^4$		
后浇混凝土	66.1	$5.1 \times 10^4$		
剪力钉		$2.1 \times 10^5$	430	520
钢筋		$2.0 \times 10^5$	335	455

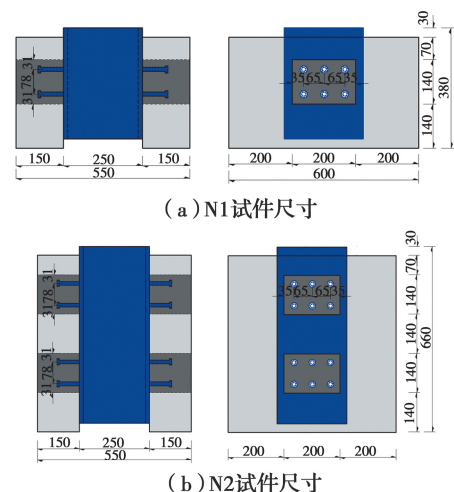


图 1 试件尺寸(单位:mm)

Fig. 1 Specimen size(unit: mm)

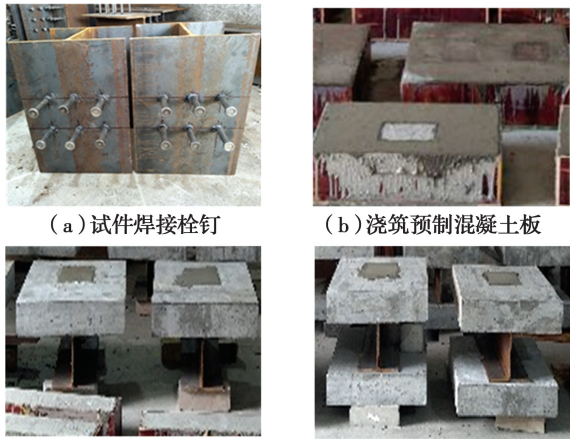


图 2 试件制作顺序

Fig. 2 Production sequence of test piece

### 1.2 测点布置和加载方案

采用电子位移计测量试件整体位移。采用 10 000 kN 电液伺服万能试验机进行加载(图 3)。

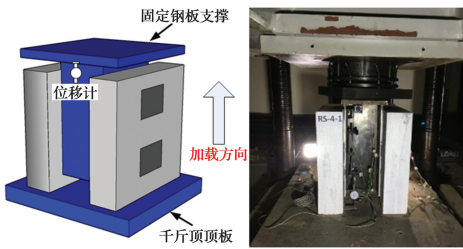


图 3 加载及测点布置示意图

Fig. 3 Schematic diagram of loading and measuring points layout

采用分级加载进行 3 次弹性加载和 3 次弹塑性加载,最后进行破坏加载。加载方案如图 4 所示。

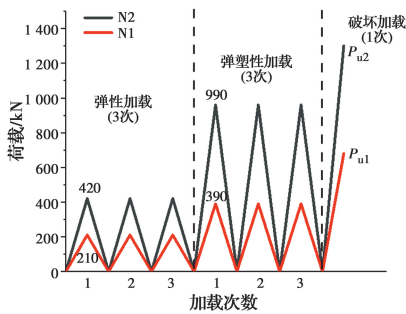


图 4 加载方案示意图

Fig. 4 Schematic diagram of loading scheme

## 2 预制-装配式群钉剪力键的有限元分析

### 2.1 建模参数

利用 Abaqus 建立装配式群钉推出试验的有限元模型,模型本构选择如表 2 所示。

表 2 模型本构

Table 2 Constitutive model

部件	混凝土板	型钢	剪力钉	构造钢筋
本构模型	损伤塑性	双折线弹塑性	双折线弹塑性	双折线弹塑性
单元	三维实体	三维实体	三维实体	桁架

加载采用位移加载,混凝土单元本构关系采用文献[19]建议的混凝土本构关系,混凝土单轴受拉、受压应力-应变曲线如图 5 所示。结合已有研究,装配式栓钉剪力键进入塑性的原因主要是栓钉周边混凝土局部进入塑性,其次是栓钉根部进入屈服甚至剪断,因此,模拟周边混凝土进入塑性以及栓钉弹塑性本构。为了模拟周边混凝土进入塑性,考虑用的是混凝土的损伤本构,因此栓钉采用双折线本构,超过屈服应变后考虑其进入屈服平台,其后栓钉依次进入屈服,在屈服之后栓钉将会通过快速变形模拟失效过程。混凝土损伤模型如图 6 所示,钢材本构以及材料的应力与塑性应变关系如图 7、表 3 所示。

表 3 钢材应力与塑性应变关系

Table 3 Relationship between steel stress and plastic strain

塑性应变	材料的单轴应力/MPa		
	钢板	钢筋	剪力钉
0.0	345	335	430
0.21	540	455	520

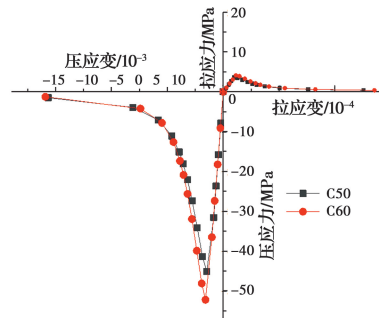


图 5 混凝土单轴应力-应变曲线

Fig. 5 Uniaxial stress-strain curve of concrete

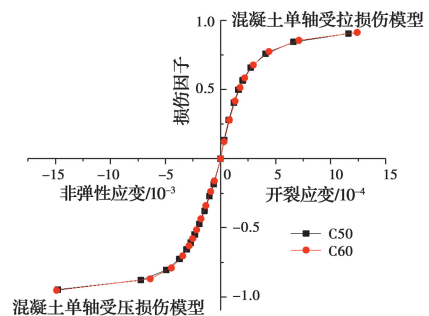


图 6 混凝土损伤模型

Fig. 6 Damage model of concrete

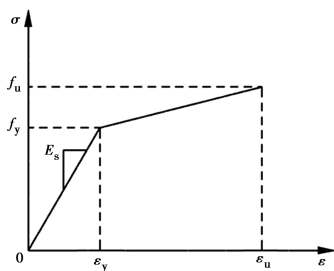


图 7 钢材本构关系图

Fig. 7 Constitutive relation diagram of steel

### 2.2 界面接触模拟方法

混凝土与钢梁及栓钉间的界面接触采用硬摩擦模拟,先后浇混凝土的顶面和侧面采用内聚力接触,底面受压采用绑定接触。装配式群钉单键群和双键群试件模型(图 8)中包括 H 型钢、预制混凝土、后浇混凝土以及钢筋骨架。

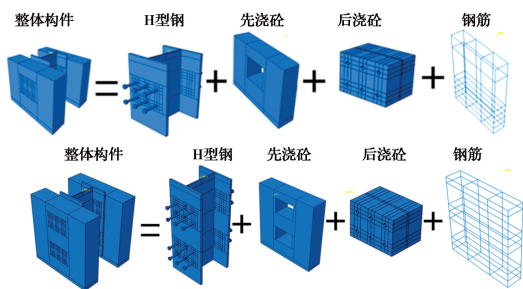


图 8 预制-装配式群钉推出试验构造图

(上为 N1 试件,下为 N2 试件)

Fig. 8 Structural drawing of push out test of prefabricated assembled group nails (N1 test piece on the top and N2 test piece on the bottom)

### 2.3 边界条件

为了模拟的真实性,在整个推出试件的下方建立一个完全固结的单元,将试件的混凝土下表面与其上表面建立摩擦接触,如图 9 所示。

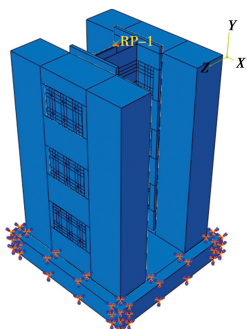


图 9 模型边界条件图

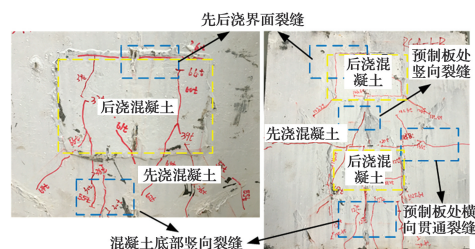
Fig. 9 Model boundary condition diagram

## 3 推出试验结果及数值模拟

### 3.1 破坏情况

N1 试件加载到 60% 极限荷载时,先后浇混凝土界面出现缝隙;随后预制混凝土表面开始出现裂缝,紧接着,裂缝沿界面角隅处 45° 向下扩展;混凝土底部出现竖向裂缝并向上扩展。N2 试件的破坏形态略有不同,裂缝首先出现在两个键群之间,随后加载端键群的先后浇混凝土界面出现裂缝并向下延伸,混凝土底部出现与下边缘垂直的竖向裂缝并向上部延伸,两键群之间的预制混凝土呈现横向贯通裂缝(图 10(a))。

所有试件破坏时栓钉根部均被剪断(图 10(b)),背离加载侧混凝土被压碎,呈半椭圆形(图 10(c))。



(a) 试件裂缝发展破坏情况(左为 N1, 右为 N2)



(b) 钢梁侧破坏情况 (c) 混凝土侧破坏情况

图 10 试件破坏情况示意图

Fig. 10 Schematic diagram of specimen damage

对比有限元模拟与试验结果(图 11),有限元模拟中的混凝土损伤基本为受拉损伤,可以反映实际结构中的混凝土开裂现象。在单键群试件中,混凝土板裂缝同样出现在先后浇界面角隅处并向外扩展,在双键群试件中,裂缝出现在两个键群先后浇界面角隅处以及双键群间的预制板处,裂缝的类型及其出现的加载顺序(裂缝出现的顺序为图 11 中的 1、2、3),与试验基本一致,认为加载过程中开裂现象吻合较好。

### 3.2 荷载-滑移曲线

由图 12 可知,N1 和 N2 的荷载-滑移曲线趋势大致相同,分为两个阶段:近似的线弹性段和塑性段。在峰值荷载的 60%~70% 之前为近似的线弹性段,在该阶段整体滑移较小而荷载快速升高;随着荷载的增大,进入塑性段后,试件的整体刚度不断减

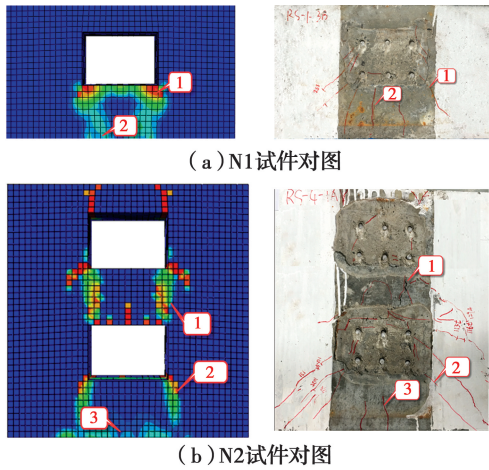


图 11 混凝土损伤云图与试验裂缝对比图

Fig. 11 Comparison of concrete damage nephogram and test crack

小,此时混凝土开裂并不断扩展,试件抵抗变形的能力逐渐变弱,试件内部的栓钉逐个进入屈服,随后荷载增长缓慢而滑移不断增大,直至试件破坏。

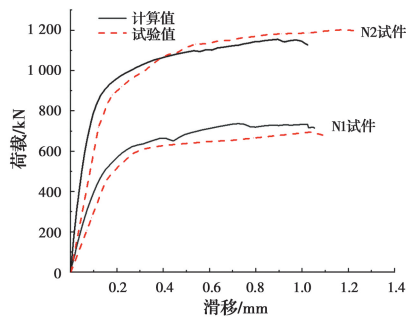


图 12 试验值与模型值荷载-滑移对比图

Fig. 12 Load-slip comparison diagram of test value and model value

数值模拟与试验实测的荷载-滑移曲线趋势基本一致,数值模拟能够较好地模拟预制-装配式键群剪力键推出试验。

### 3.3 预制-装配式钉群力学行为分析

表 4 列出了 N1 和 N2 试件实测承载力及平均单键承载力。由表 4 可知,N1 试件单个键群承载力明显高于 N2 试件。

表 4 N1 及 N2 试件试验单个键群承载力统计

Table 4 Bearing capacity statistics of single bond group in N1 / N2 test piece

试件编号	实测极限承载力/kN	平均单键群承载力/kN	折减系数 (相对于 N1)
N1	690	345	
N2	1 204	301	0.87

为了进一步研究键群数量对栓钉连接件的力学行为影响,采用上述模型参数及建模方法,模拟 3 个键群及 4 个键群的预制-装配式键群剪力键推出试验(图 13)(编号为 N3、N4)。N3 和 N4 试件的栓钉布置形式及数量与 N1、N2 一致,钉群数量分别为 3 个及 4 个。

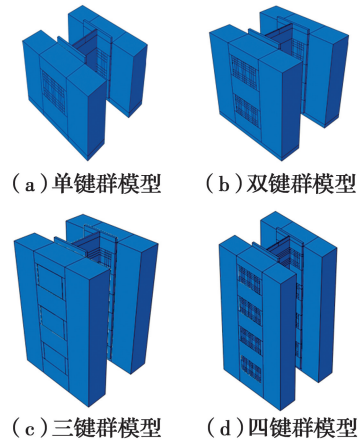


图 13 各键群模型示意图

Fig. 13 Schematic diagram of each bond group model

各键群的荷载-滑移曲线如图 14 所示。剪力键的承载力和刚度均与键群数量显著相关:随着键群数量的增加,试件的抗剪承载力和抗剪刚度均随之增长,但单个键群的承载力则随键群数量下降。

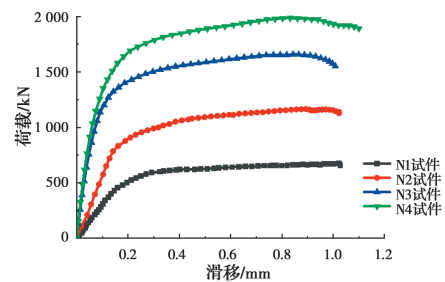


图 14 各试件荷载-滑移曲线图

Fig. 14 Load-slip curve of each test piece

为了分析剪力键沿剪力方向的受力分布,提取沿试件高度不同位置的钢梁与混凝土间的滑移变形,具体为各个键群中部以及键群与键群中部(图 15)(N3、N4 试件同 N2)。

由图 16 可知,滑移值沿受力方向分布呈现明显的不均匀,下端的滑移大于上端,滑移从下至上基本呈递减趋势,滑移差值最大可达到 1.5 mm,界面最小滑移约为最大滑移的 67%,表现出明显的不均匀性;随着荷载增加,两端的差值增加,但考虑到总移

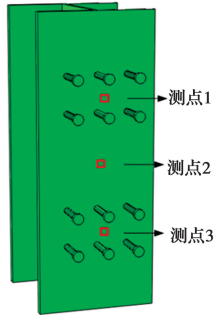


图 15 N2 试件滑移测量位置

Fig. 15 N2 test piece slip measurement position

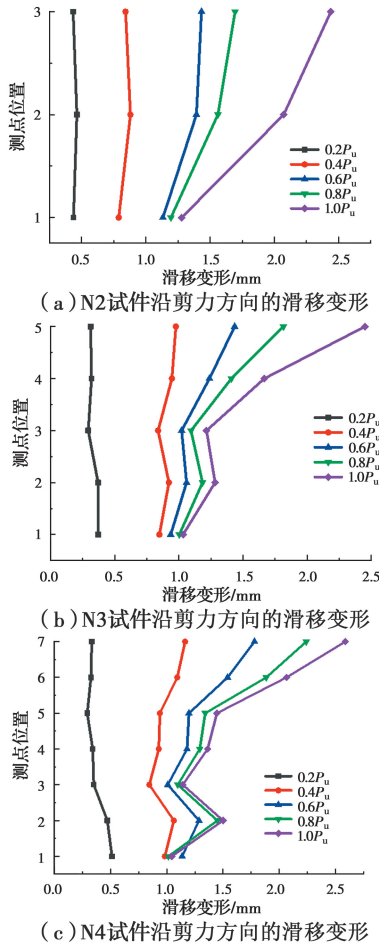


图 16 各试件不同荷载下剪力方向的界面滑移  
Fig. 16 Interface slip in shear direction of each specimen under different loads

量的增加,相对不均匀程度减小。考虑到界面滑移变形基本为栓钉的受力变形,其不均匀实际上反映出界面剪力的不均匀,这一现象与多键群试件中单个键群的承载力折减现象有密切关系。

提取各试件中每个钉群同一位置(第 2 排中间位置)栓钉的剪应力云图,如图 17 所示,图上数字代表各剪力钉根部剪应力大小,由图 17 可知,在同个

试件中栓钉受力不均匀,呈现出下方大上方小的特点,N1~N4 试件中最大栓钉受力相近,但是平均单个栓钉的剪应力分别为 290、250、240、210 MPa,随着栓钉群个数的增多,栓钉折减程度也在增大,栓钉受力不均匀会导致承载力的折减。将图 17 中的数据画成折线图(图 18),可以更为直观的看出各个钉群剪力分布不均匀,从上到下分别为一、二、三、四键群。

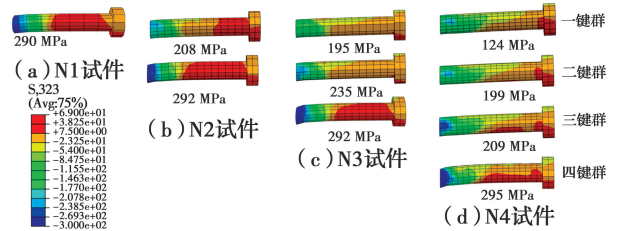


图 17 各试件每个钉群同一位置处栓钉应力云图  
Fig. 17 Stress nephogram of stud group at the same position of each specimen

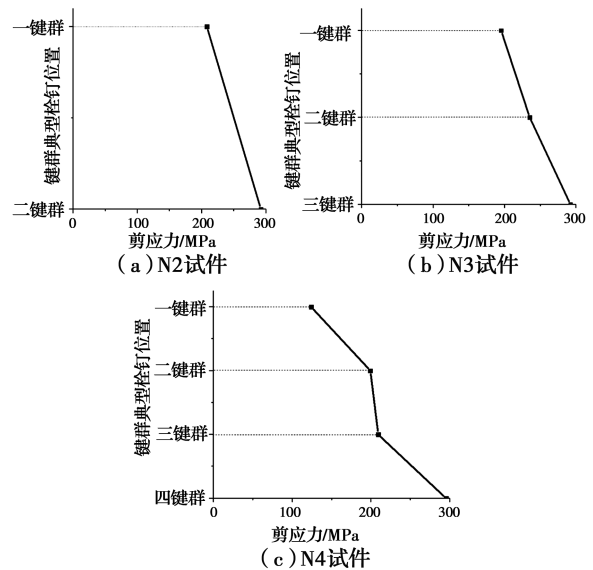


图 18 各试件典型栓钉剪应力

Fig. 18 Typical stud shear stress of each specimen

### 3.4 多键群承载力折减效应分析

由表 5 可知,单个键群平均承载力随键群数量增多而减小,N4 试件较 N1 试件承载力折减了 28%。分析认为,折减效应是由于沿受力方向各承载力构件受力不均匀导致。当单键群试件受力时,单个键群的极限状态即为整个试件的极限状态;当多键群试件受力时,由于键群间的受力不均匀,多个键群不能同步达到其极限状态,此时,多键群试件承载力不再是对应的所有键群的承载力之和,这种现象

即导致多键群的承载力折减效应。

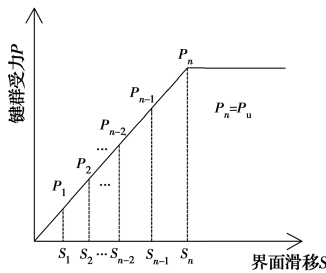
表 5 各试件计算单个键群承载力统计

Table 5 Calculation of bearing capacity of single key group of each test piece

试件编号	极限承载力/kN	平均单键群承载力/kN	折减系数 (相对于 N1)
N1	686	343	
N2	1 155	288	0.84
N3	1 658	276	0.80
N4	1 986	248	0.72

为简化理论推导过程,假设:栓钉剪应力和滑移在弹性阶段成正比,栓钉开始屈服时试件到达极限承载力,如图 19 所示。根据能量法,能量=力×变形,由于变形不均匀导致受力不均匀,每个试件的最大能量体现了变形不均匀程度。对在  $n$  个键群时,折减系数为

$$\xi_n = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{nP_u} \quad (1)$$



注:  $P_1, P_2, \dots, P_n$  顺序为示意;  $P_n$  为栓钉屈服时的单个钉群承载力

图 19 剪力与滑移的关系

Fig. 19 Relationship between shear and slip

将图 18 中的数值带入式(1),计算出的 N2、N3、N4 试件承载力折减系数为 0.86、0.82、0.72,与表 5 比较可以认为,能量法面积折减可以较好地描述承载力折减的机理,表明键群间受力的不均匀性是多键群承载力折减效应的原因,并可根据其不均匀性计算出承载力折减系数。

承载力折减系数与键群数量有关,键群数量越多,承载力折减越大,以  $\xi$  为承载力折减系数,由计算得到,当  $n \geq 2$  时

$$\xi = 0.359 4/n + 0.652 8 \quad (2)$$

式中: $n$  为键群个数。

## 4 结论

1)单键群和双键群试件的荷载-滑移曲线趋势无明显差异,呈现出近似两段式:近似线弹性段和塑性段。破坏形态有所不同,且双键群试件的破坏程度大于单键群试件。

2)试件加载过程中,滑移从上至下逐渐递增,下端键群滑移值最大。承载力折减效应与界面剪力分布不均匀有关。

3)单个键群的承载力折减随键群数量增加而增大,四键群试件中单个键群承载力较单键群承载力折减达到 28%。

4)基于能量法得出的承载力折减系数与计算的承载力折减系数吻合;提出了预制-装配式中单钉平均抗剪承载力折减系数公式。

### 参考文献:

[1] 聂建国,余志武. 钢-混凝土组合梁在我国的研究及应用[J]. 土木工程学报, 1999, 32(2): 3-8.  
NIE J G, YU Z W. Research and practice of composite steel-concrete beams in China [J]. China Civil Engineering Journal, 1999, 32(2): 3-8. (in Chinese)

[2] YANG F, LIU Y Q, JIANG Z B, et al. Shear performance of a novel demountable steel-concrete bolted connector under static push-out tests [J]. Engineering Structures, 2018, 160: 133-146.

[3] BAMAGA S O, TAHIR M M, TAN C S, et al. Push-out tests on three innovative shear connectors for composite cold-formed steel concrete beams [J]. Construction and Building Materials, 2019, 223: 288-298.

[4] 黄彩萍,张仲先,郑舟军,等. 钢混组合结构中剪力键群的力学性能及破坏机理试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2015, 37(2): 100-105.  
HUANG C P, ZHANG Z X, ZHENG Z J, et al. Force characteristics and failure mechanism experimental study of group-nail in steel-concrete composite structure [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2015, 37(2): 100-105. (in Chinese)

[5] 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 X H, LU W R, DI J, et al. Group studs effect and shear strength calculation method for group studs shear connector of steel anchor box [J]. China Journal of Highway and Transport, 2014, 27(12): 33-45. (in

- Chinese)
- [6] 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): 699-705.  
SU Q T, LI Y. Shear capacity of grouped stud connector embedded by high strength mortar [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2015, 43(5): 699-705. (in Chinese)
- [7] 苏庆田, 韩旭, 任飞. 多排焊钉推出试验试件力学性能[J]. 同济大学学报(自然科学版), 2014, 42(7): 1011-1016.  
SU Q T, HAN X, REN F. Static behavior of push-out specimen with multi-row stud connectors [J]. Journal of Tongji University (Natural Science), 2014, 42(7): 1011-1016. (in Chinese)
- [8] ZHANG J, HU X M, FU W J, et al. Experimental and theoretical study on longitudinal shear behavior of steel-concrete composite beams [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 171: 106144.
- [9] WANG Y H, YU J, LIU J P, et al. Experimental study on assembled monolithic steel-concrete composite beam in positive moment [J]. Engineering Structures, 2019, 180: 494-509.
- [10] SUWAED A S H, KARAVASILIS T L. Demountable steel-concrete composite beam with full-interaction and low degree of shear connection [J]. Journal of Constructional Steel Research, 2020, 171: 106152.
- [11] WANG Y H, YU J, LIU J P, et al. Experimental and numerical analysis of steel-block shear connectors in assembled monolithic steel-concrete composite beams [J]. Journal of Bridge Engineering, 2019, 24(5): 04019024.
- [12] 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.
- [13] 项贻强, 郭树海, 邱政, 等. 群钉布置方式对钢-混凝土组合小箱梁受力性能的影响分析[J]. 建筑结构学报, 2017, 38(Sup1): 376-383.  
XIANG Y Q, GUO S H, QIU Z, et al. Influence of group studs layout style on static behavior of steel-concrete composite small box girder models [J]. Journal of Building Structures, 2017, 38(Sup1): 376-383. (in Chinese)
- [14] 刘沐宇, 王松, 张强. 港珠澳大桥组合连续箱梁桥剪力钉受力分析[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(2): 118-123.  
LIU M Y, WANG S, ZHANG Q. Pulling force analysis of shear studs in steel-concrete composite continuous box girder of Hongkong-Zhuhai-Macao bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(2): 118-123. (in Chinese)
- [15] 刘沐宇, 毛玉东, 邓晓光, 等. 港珠澳大桥组合连续箱梁模型试验研究[J]. 武汉理工大学学报, 2014, 36(9): 90-95.  
LIU M Y, MAO Y D, DENG X G, et al. Model test of continuous composite box girder in Hong Kong-Zhuhai-Macao bridge [J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2014, 36(9): 90-95. (in Chinese)
- [16] SHIM C S, KIM D W. Design codes on stud shear connectors for new details [C]//International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete. 2016: 703-711.
- [17] European Committee for Standardization (CEN). Eurocode 4 design of composite steel and concrete structures, Part 1. 1: General rules and for buildings [S]. Brussels, 1994
- [18] 普通混凝土力学性能试验方法标准: GB/T 50081—2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2003.  
Standard for test method of mechanical properties on ordinary concrete: GB/T 50081-2002 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2003. (in Chinese)
- [19] 混凝土结构设计规范: GB 50010—2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.  
Code for design of concrete structures: GB 50010-2010 [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2011. (in Chinese)

(编辑 胡玲)